

Petri & Tiemann GmbH, Bremen

in Zusammenarbeit mit  
Transsolar Energietechnik GmbH, München

und in Kooperation mit dem Bauherrn  
BEAN Bremerhavener Entwicklungsges. Alter/Neuer Hafen mbH & Co. KG,  
Bremerhaven

## **Integrale Planung innovativer Energieversorgungskonzepte für das Klimahaus® Bremerhaven 8° Ost**



Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 22326-25 von der



von

Arne Dunker (Petri & Tiemann),  
Christian Oberdorf, Dr. Wolfgang Keßling (Transsolar)

1. Fassung: April 2009

Überarbeitung: August 2009

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>22326</b>	Referat	<b>25</b>	Fördersumme	<b>91.988,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Integrale Planung innovativer Energiekonzepte für das Klimahaus Bremerhaven 8° Ost</b>				
<b>Stichworte</b>	Ökobau, energieeffizientes Bauen , Haustechnik , integrale Bauplanung , Neubau				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
	<b>01.07.2004</b>	<b>31.12.2008</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Petri & Tiemann GmbH Fahrenheitstraße 11 28 359 Bremen			Tel	0421-16845-0
				Fax	0421-16845-15
				Projektleitung	
				Arne Dunker	
				Bearbeiter	
				Arne Dunker	
<b>Kooperationspartner</b>	BEAN Bremerhavener Entwicklungsgesellschaft Alter/Neuer Hafen mbH & Co. KG (Bauherr)				
	TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, München				

### ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Das Klimahaus<sup>®</sup> Bremerhaven 8° Ost stellt als spektakuläre Besucherattraktion zum Thema Klima und als Bauvorhaben besondere Anforderungen an das Energieversorgungskonzept. Dem Besucher sollen realistische, überraschende und wohlmöglich spektakuläre Klimaerfahrung ermöglicht werden. Hierbei soll der Primärenergiebedarf möglichst gering gehalten werden sowie regenerative Energien genutzt werden. Umweltfreundliche Technologien und innovative Versorgungswege sollen angewandt werden, wobei zugleich eine wirtschaftliche Versorgung gewährleistet sein soll.

Gleichzeitig bietet das Klimahaus<sup>®</sup> Bremerhaven 8° Ost aufgrund seiner thematischen und didaktischen Ausrichtung und einer Besucherfläche von rund 11.500 m<sup>2</sup> die einmalige Chance, verschiedene Fragestellungen rund um die Themen Umweltschutz, Klimaveränderung und nachhaltige Energieversorgung zu verschmelzen und schlägt so eine Brücke zwischen globalen Prozessen, technischen Lösungen und dem eigenen Handlungsbewusstsein des Besuchers.

Aus den Projektmitteln konnte bisher (in 2003) ein Konzeptentwurf erarbeitet werden. Im Verlauf der Entwurfsphase (HOAI Phase 3) hat sich gezeigt, dass die interessanten Ziele und die faszinierenden Möglichkeiten des Projekts Klimahaus<sup>®</sup> aufgrund der komplexen Fragestellungen mit den in der HOAI üblichen Mitteln nicht befriedigend erreicht werden können. Die vorliegenden Ansätze sollen daher weiterentwickelt und im Zuge einer integralen Planung zur Grundlage für eine ingenieurmäßige Haustechnik- und Energieversorgungsplanung werden. Ziel ist es vorrangig, ohne Einbußen bei der Erlebnisqualität den Primärenergiebedarf zu senken, auf vorhandene Umweltenergie zurückzugreifen und energieeffiziente Synergien und umweltfreundliche Technologien zu nutzen.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Im Zuge eines integralen Planungsprozesses, der die Anforderungen der unterschiedlichen Fachplaner zusammenführt, bewertet und zu gemeinsamen Lösungen führt, sollen für das Klimahaus<sup>®</sup> innovative Energieversorgungskonzepte entwickelt und in Ihrer Umsetzung begleitet werden. Ein Dokumentation und eine Emissionsbilanz (CO<sub>2</sub>-Studie) begleiten das Projekt und bilden eine Informationsbasis für spätere, vergleichbare Projekte. Schwerpunktmäßig sind folgende Arbeitsinhalte zu nennen:

## **Entwicklung, Ausarbeitung und Begleitung der Umsetzung von Konzepten zu:**

- Ø gebäudeintegrierter Stromerzeugung über Fotovoltaik
- Ø gebäudeintegrierter Stromerzeugung aus Windkraft
- Ø Nutzung von Geothermie: Rückkühlung über Brunnen, Meerwasser, Erdwärmetauscher, Erdkanal
- Ø innovativen Systemen zur Kühlung: Flow-Ice Prozesse, Ad/Absorptions-technologien
- Ø vorrangiger Fernwärmenutzung: Desiccant Cooling Systeme, Absorptionskälte (mit festen Sorbentien z.B. Zeolith, Silicagel)
- Ø innovativen Niedertemperatur-Technologien zur Latentwärmerückgewinnung: Liquid Desiccant Cooling Systems (mit flüssigen Sorbentien z.B. Salzlösungen)
- Ø Kraft-Wärme-Kälte-Versorgung (BHKW) über Gas, einstufige Absorbertechnologie
- Ø Primärenergetisch hocheffizienten BHKW mit zweistufiger Absorbertechnologie
- Ø Nutzung von Biomasse z.B. aus Treibholz

## **Studie zur CO<sub>2</sub> Emission des Klimahaus<sup>®</sup>**

Inhalt der Betrachtung ist die Emissionsbilanz des Klimahaus<sup>®</sup> hinsichtlich der Emission von Treibhausgasen (am Beispiel von CO<sub>2</sub>) zu bewerten und in Relation zu der persönlichen Bilanz eines typischen Besuchers zu setzen. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sollen als Grundlagen für eine Vermittlung des Themas dienen und eine inhaltliche Brücke zwischen dem Energiekonzept und dem Besucher bzw. dem Besuch im Klimahaus<sup>®</sup> bilden.

## **Dokumentation der Ergebnisse und Veröffentlichung**

Der Projektlauf und die Ergebnisse werden in Form eines Kurzexposés dokumentiert und beispielsweise in Fachzeitschriften und als Tagungsbeiträge veröffentlicht.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die Planung des Klimahaus Bremerhaven 8 °Ost stellte für alle Planungsbeteiligten eine besondere Aufgabe dar. Dies lag vor allem an der außergewöhnlich komplexen baulichen Struktur des Gebäudes sowie den vielfältigen und ungewöhnlichen, teilweise extremen Nutzungsanforderungen – mithin für das Klimaengineering eine besonders spannende Herausforderung. Es zeigte sich, dass gerade in einem komplexen Bauvorhaben ein übergreifender, integraler Planungsansatz nötig ist, um – unabhängig von einzelnen Gewerken und Disziplinen – die wesentlichen Fragestellungen zu erkennen, Prioritäten zu ordnen und gewerkeübergreifend ein Gesamtkonzept zu entwickeln, dessen Umsetzung zu begleiten und so Synergien und Einsparungen nutzbar zu machen. Trotz einiger Schwierigkeiten und Umwege in einem langwierigen Planungsprozess mit wechselnden Planungspartnern konnte im Hinblick auf das Klima- und Energiekonzept vieles erreicht werden. Hilfreich und wichtig war dabei die durchgängige und uneingeschränkte Unterstützung dieses Prozesses durch Betreiber und Bauherr.

Es konnte gezeigt werden, dass eine eingehende und kritische Analyse der Nutzung und Anforderungen und den damit verbunden Ansätzen bezüglich des Energiebedarfs eine Schlüsselaufgabe darstellt, die eine Integration natürlicher bzw. natürlich unterstützter Klimakonzepte oft erst ermöglichte. Wie in vielen anderen Ausstellungsgebäuden bzw. Freizeiteinrichtungen dominieren die elektrischen und damit internen Wärmelasten das energetische Geschehen und sorgen für ganzjährigen Kühlbedarf. Durch die systematische Überarbeitung der internen Lasten mit den beteiligten Fachplanern konnten der Kältebedarf gegenüber dem Stand Oktober 2003 um ca. 50% reduziert werden.

Für die Ausstellungsbereiche (Elemente, Perspektiven und Zentralbereich) konnte der mechanische Anteil der Kälte zunächst etwa um den Faktor 4 reduziert werden. In der weiteren Planung wurde für diese Gebäudeteile das Klimakonzept weiterentwickelt, so dass diese Gebäudeteile vollständig ohne den Einsatz mechanischer Kälteerzeugung auskommen und das natürliche Kühlpotential des Standortes (z.B. über Energiepfähle) maximal ausgenutzt wird.

Am Standort verfügbare Fernwärme aus einem Müllheizkraftwerk deckt den Wärmebedarf und wird darüber hinaus gezielt zur Kühlung einzelner Gebäudebereiche über eine Absorptionskältemaschine und ein Desiccant Cooling System genutzt.

In der Summe werden nach heutigem Kenntnisstand durch die gewählte Energieversorgung die Emissionen auf ca. 5,6% der Referenzsysteme reduziert. Diese Zahl stellt ein Ergebnis dar, mit dem das Klimahaus seinem hohen Anspruch an die eigenen Maßstäbe gerecht wird.

Insgesamt zeigte sich, wie wichtig es für den Erfolg der integralen Planung ist, den begonnenen Prozess von der Konzeptplanung über die Definition der konkreten Ausführung bis zur Umsetzung kontinuierlich zu verfolgen. Auch lohnt es sich innerhalb dieses Prozesses die Planung der „standardmäßigen“ Haustechnikkonzepte im Auge zu behalten.

Zur Ermittlung des tatsächlichen Energiebedarfs und zur abschließenden Bewertung der Konzepte empfiehlt sich ein Monitoring bzw. zumindest die systematische Erfassung und Auswertung des realen Betriebs des Gebäudes.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Das Energiekonzept wurde bislang in verschiedenen Presseberichten, Publikationen und Vorträgen präsentiert. Eine Auflistung ist im Abschlussbericht zu finden.

Darüber hinaus wird das Energiekonzept anhand eines Exponats im Foyer des Klimahauses den Besuchern erklärt und vermittelt. Zudem können die Besucher an den CO<sub>2</sub> Terminals im Klimahaus ihre persönliche CO<sub>2</sub>-Bilanz ermitteln und ihr KlimaKonto erstellen. In den so genannten „Spielräumen“ im Ausstellungsbereich CHANCEN haben sie die Möglichkeit, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedenen Lebensbereichen zu reduzieren. Dazu erhalten die Besucher spielerisch nützliche Tipps für Klimaschutz im Alltag.

## **Fazit**

Ausgangspunkt war die kritische Auseinandersetzung mit der Nutzung und den Nutzungsanforderungen sowie eine ausführliche Analyse des Energiebedarfs und seiner Struktur. Ein bewusster Umgang mit internen Wärmelasten bei allen Planungspartnern (insbesondere bei der Ausstellungsinszenierung) führte zu einer signifikanten Reduktion der Ansätze und eröffnete so den Weg für natürliche und natürlich unterstützte Klimakonzepte. Mehrfachnutzung von Bauteilen und die gewerkeübergreifende Verknüpfung einzelner Bestandteile des Gebäudes waren weitere Planungsbestandteile. Auf dieser Basis konnte ein Klima- und Energieversorgungskonzept entwickelt werden, das es beispielsweise ermöglicht, wesentliche Teile des Gebäudes vollständig ohne den Einsatz mechanischer Kälteerzeugung zu klimatisieren oder Fernwärme – zumindest gezielt in Einzelbereichen – zur Kälteerzeugung einzusetzen und so wertvolle Primärenergie einzusparen.

Die für die planerische und tatsächliche Umsetzung nötige enge konzeptionelle Abstimmung mit unterschiedlichen beteiligten Planungsbeteiligten und Gewerken – von der Ausstellungsplanung über Rohbau und Haustechnik bis hin zur Fassade – ist dabei essentiell für den Erfolg des integralen Planungsprozess. Dies gelang in vielen Bereichen gut, wenngleich festzustellen bleibt, dass aufgrund des langwierigen und verzweigten Planungsablaufs das Potential einer integralen Planung womöglich nicht an allen Stellen maximal ausgeschöpft werden konnte. An einigen Stellen erwies sich die bauliche Umsetzung einzelner Konzeptelemente als aufwändiger als ursprünglich vorgesehen. Es zeigt sich auch, dass neben der Entwicklung übergreifender Konzepte die effiziente Planung und Umsetzung der „standardmäßigen“ Haustechniksysteme nicht aus den Augen verloren werden sollte.

Gerade deshalb halten es die Autoren für empfehlenswert, integrale Planung als Planungskonzept und – bestandteil in derartigen Bauprojekten grundsätzlich anzuwenden und deren Verankerung im Planungsablauf weiter zu optimieren. Der planerische Mehraufwand, der zweifelsohne entsteht, im standardmäßigen Planungsumfang jedoch üblicherweise nicht abgedeckt ist, ist im Gesamtergebnis positiv ablesbar.

Im konkreten Fall des Klimahauses erscheint es als nächster Schritt empfehlenswert, zur Ermittlung des tatsächlichen Energieverbrauchs sowie als Grundlage für die Betriebs- und energetische Optimierung ein Monitoring-Programm – oder zumindest eine intensiviertere und quantitative Betriebsüberwachung der wichtigsten Anlagenkomponenten und Energieströme – anzusetzen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Integrale Planung: Klimakzept und Energieversorgung als Gesamtkonzept</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Zusammenfassung, Stand der Vorarbeiten zum Projekt Begin in 2004</b> .....	<b>13</b>
3.1.1 Raumbuch (Stand Sept. 2003).....	13
3.1.2 Randbedingungen, Beispiel Zone 1 (Stand Sept. 2003).....	16
3.1.3 Energetische Gebäude Zonierung (Stand Sept. 2003).....	17
3.1.4 Definition der Klimabedingungen in der Reise (Stand Sept. 2003) .....	17
3.1.5 Besucherprofil und Betriebszeiten (Stand Sept. 2003) .....	18
3.1.6 Wärmeabgabe des Menschen .....	19
<b>3.2 Wesentliche Elemente der Konzept-Planung für die Gebäudeklimatisierung</b> ....	<b>21</b>
3.2.1 Zonierung des Gebäudes.....	21
3.2.2 Analyse und Überarbeitung der Nutzungsanforderungen.....	24
3.2.2.1 Klimatische Anforderungen .....	24
3.2.2.2 Wärmelasten.....	24
3.2.2.3 Raumbuch .....	27
3.2.3 Konzeptplanung am Beispiel des Bereiches „Elemente“ .....	27
3.2.3.1 Konzeptentwicklung (Integration Gebäudemasse, natürliche Lüftung) .....	27
3.2.3.2 Vergleich mit konventionellem Klimatisierungskonzept .....	29
3.2.3.3 Bewertung des Konzepts, thermische Simulation.....	32
3.2.3.4 Zusammenfassung des Konzepts für „Elemente“ (Stand Nov. 2004) .....	36
3.2.3.5 Übertragung auf andere Gebäudebereiche .....	37
3.2.4 Ermittlung des Gebäude-Energiebedarfs .....	38
3.2.5 Potential des regenerativen Anteils am Kältebedarf – Vergleich mit konventioneller Planung.....	40
<b>3.3 Planung des Energieversorgungskonzepts</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 Analyse der Energiebedarfs.....	41
3.3.2 Entwicklung und Vergleich verschiedener Energieversorgungsszenarien .....	42
3.3.2.1 Nutzung von Fernwärme und Einsatz dezentraler Kraft-Wärme-Kälte Kopplung.....	42

3.3.2.2	Untersuchte Versorgungsszenarien, Stand November 2004 .....	43
3.3.2.3	Thermische Nutzung des Untergrundes .....	46
3.3.2.4	Thermische Nutzung des Weserwassers .....	49
3.3.2.5	Nutzung von Photovoltaik.....	51
3.3.3	Ergebnis .....	51
3.3.3.1	Das umgesetzte Energieversorgungskonzept .....	51
3.3.3.2	Das umgesetzten Klima und Energiekonzept .....	53
<b>3.4</b>	<b>Umsetzung der Planung.....</b>	<b>54</b>
3.4.1	Definition und Dokumentation von Anforderungen für die Umsetzung.....	54
3.4.2	Konkrete Umsetzung der Konzeptelemente, Beispiele.....	54
3.4.2.1	Bauteilaktivierung.....	55
3.4.2.2	Natürliche Lüftung.....	56
3.4.2.3	Geothermiefeld .....	56
3.4.2.4	Absorptionskältemaschine .....	58
3.4.2.5	Photovoltaik-Anlage .....	58
<b>4</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Studie.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Bewertung spezifischer CO<sub>2</sub> Emissionsfaktoren .....</b>	<b>60</b>
4.1.1	Fernwärme .....	61
4.1.2	Strom.....	61
4.1.3	Gas.....	61
4.1.4	Wasser / Abwasser.....	61
<b>4.2</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Betrieb des Klimahauses .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>Persönliche Bilanz.....</b>	<b>63</b>
4.3.1	Wieviel CO <sub>2</sub> Emissionen sind mit einem Besuch des Klimahauses pro Besucher verbunden?.....	63
4.3.2	Was können Besucher tun um CO <sub>2</sub> -Emissionen zu vermeiden? .....	68
<b>5</b>	<b>Dokumentation und Veröffentlichung.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>71</b>
	<b>Berichtverzeichnis, Hauptberichte .....</b>	<b>72</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>A-1</b>
	<b>A : Schemata Energieversorgungskonzepte .....</b>	<b>A-1</b>
	<b>B : Ökonomische Bewertung, Stand November 2004 [3] .....</b>	<b>B-10</b>
	<b>C : Ökologische Bewertung, Stand November 2004 [3].....</b>	<b>C-11</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Schnitt durch die Gebäudehülle, Zonenwände, Stand 15.9.2003.....	17
Abbildung 2: Übersicht im h,x Diagramm mit Definition der Temperaturen und Feuchte in den Klimazonen 1 bis 6 der Reise. Hinterlegt sind die Außenluftzustände TRY Bremerhaven (8760 Datenpunkte), Stand 15.9.2003.....	18
Abbildung 3: Besucherprofil Klimahaus, Jahresübersicht.....	20
Abbildung 4: Besucherprofil Klimahaus, Beispiel je eine Woche pro Saison.....	20
Abbildung 5: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +5.00.....	21
Abbildung 6: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +9.20.....	22
Abbildung 7: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +14.20.....	22
Abbildung 8: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +16.20.....	23
Abbildung 9: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +20.20.....	23
Abbildung 10: Zonierung des Bereiches „Elemente“ für die thermische Simulation mit wichtigen Randbedingungen.....	28
Abbildung 11: Innovatives Lüftungskonzept „Elemente“: Zonierung der Bereiche mit natürlicher und mechanischer Lüftung.....	29
Abbildung 12: Grundkonzept Klima und Lüftung „Elemente“.....	30
Abbildung 13: Natürliches Lüftungskonzept „Elemente“ mit mechanischer Zuluft im inneren Bereich und natürliche Lüftung im äußeren Bereich.....	30
Abbildung 14: Variante der thermischen Simulation mit Belegungsgrad Bauteilaktivierung (BTA) 50%.....	31
Abbildung 15: Variante der thermischen Simulation mit Belegungsgrad Bauteilaktivierung (BTA) 80%.....	31
Abbildung 16: Jahres-Temperaturstatistik Zone 1 (Ebenen +5.00 – +16.80) im Bereich „Elemente“ für 50% Belegung Bauteilaktivierung (BTA) bzw. Kühldecke (KD als Ergebnis der dynamischen thermischen Gebäudesimulation, Stand 4.10.2004).....	33
Abbildung 17: Jahres-Temperaturstatistik Zone 1 (Ebenen +5.00 – +16.80) im Bereich „Elemente“ für 80% Belegung Bauteilaktivierung (BTA) bzw. Kühldecke (KD) als Ergebnis der dynamischen thermischen Gebäudesimulation, Stand 4.10.2004.....	33
Abbildung 18: Vergleich des regenerativen Kühlpotentials für den Fall 80% aktive Belegung zwischen Bauteilaktivierung (BTA) und. Kühldecke (KD) als Summe für den Gesamtbereich „Elemente“.....	34
Abbildung 19: Temperaturverlauf in Zone 1 des Bereiches „Elemente“ während einer sommerlichen Periode (Bauteilaktivierung 80% Belegung).....	35
Abbildung 20: Statistische Verteilung der Außentemperatur im TRY Bremerhaven mit Kennzeichnung der Betriebszustände des natürlichen Lüftungskonzepts für den Bereich „Elemente“.....	36

Abbildung 21: Vergleich des regenerativen Kühlpotentials für den Fall 80% aktive Belegung zwischen Bauteilaktivierung (BTA) und Kühldecke (KD) als Summe für den Gesamtbereich „Elemente“ (Stand Okt. 2004).....	37
Abbildung 22: Jahresprofile für Wärme- und Kältebedarf (Stand 4.10. 2004) .....	39
Abbildung 23: Geordnete Jahresdauerlinie Heizwärme- und Kältebedarf Klimahaus (Stand: 4.10. 2004).....	39
Abbildung 24: Vergleich des Kältebedarfs Stand Sept. 2003 und Okt. 2004 nach Gebäudezonen.....	40
Abbildung 25: Vergleich des Kältebedarfs Stand Sept. 2003 und Okt. 2004 nach Gebäudezonen mit Kennzeichnung des regenerativen und mechanischen Anteils für den Ausstellungsbereich (Stand Okt. 2004) .....	41
Abbildung 26: Geordnete Jahresdauerlinien der Leistungen der verschiedenen Kälteniveaus und der Heizleistung (Stand Nov. 2004).....	42
Abbildung 27: Zeitprofil Wärmebedarf mit Wärmeverschiebung für DCS und Kaltwassererzeugung 6/12°C.....	43
Abbildung 28: Gebäudelängsschnitt G-G mit Lage des Erdkanals und möglicher Anordnung der technischen Einrichtungen, schematische Darstellung, nicht maßstäblich .....	46
Abbildung 29: Prinzipielles hydraulisches Konzept zur Einbindung der Energiepfähle .....	48
Abbildung 30: Beispiel des Temperaturverlaufs am Eintritt und Austritt des Energiepfahlfelds .....	48
Abbildung 31: Vergleich der Jahres-Temperaturstatistiken Zone 1 der „Elemente“ (mit Bauteilaktivierung, BTA) bei Einsatz des Geothermiefeldes zur Zuluft-Kühlung im Vergleich zu Bereitstellung einer konstanten Kühlung der Zuluft aus mechanischer Kälteerzeugung .	49
Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Nutztemperatur (sekundärseitig) aus der Weser und aus einem Kühlturm auf Basis von Messdaten aus dem Jahr 2001. Während der grünen Bereiche stand aus einem Kühlturm eine niedrigere Nutztemperatur als aus der Weser zur Verfügung .....	50
Abbildung 33: Schematische Darstellung des umgesetzten Energieversorgungskonzepts..	52
Abbildung 34: Schematische Darstellung des Klima- und Energiekonzepts für den Ausstellungsbereich „Elemente“ im Sommerfall .....	53
Abbildung 35: Schematische Darstellung einiger Elemente des Klima- und Energiekonzepts im Längsschnitt durch das Klimahaus .....	53
Abbildung 36: Beispiel Anschlussdetail Deckendurchführung der Rohrregister in der Betondecke (links) und Belegungsplan Bauteilaktivierung (rechts).....	55
Abbildung 37: Motorisierte Fassadenklappen (links) und Lüftungsöffnungen im Raum zum Fassadenzwischenraum für die natürliche Lüftung im Bereich Elemente .....	56
Abbildung 38: Geothermie in der Umsetzung: Mit Kunststoffrohren belegte Armierungskörbe der Gründungspfähle (oben links), Verlegung der Anbindeleitungen in der Bodenplatte (unten), fertiger Verteilerbalken in der Tiefgarage (oben rechts).....	57
Abbildung 39: Fertiggestellte glasintegrierte PV-Anlage im Dach der „Plaza“ erzeugt elektrischen Strom und übernimmt Sonnenschutzfunktion .....	59

Abbildung 40: Zonenaufteilung des Anreisegebiets.....	65
Abbildung 41: Besucherzahlen aus den Zonen A (15 min) bis G (135 min).....	65
Abbildung 42: CO <sub>2</sub> Emission für An- und Abreise je Entfernungszone pro Person in kg.....	67
Abbildung 43: CO <sub>2</sub> Emissionen pro Person bei einem Besuch im Klimahaus.....	67
Abbildung 44: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 1 (konventionelles Referenzszenario).....	A-1
Abbildung 45: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 2.....	A-2
Abbildung 46: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 3.....	A-3
Abbildung 47: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 4.....	A-4
Abbildung 48: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 5.....	A-5
Abbildung 49: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6.....	A-6
Abbildung 50: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6A.....	A-7
Abbildung 51: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6B.....	A-9
Abbildung 52: Vergleich der Versorgungsszenarien hinsichtlich der Jahres-Energiekosten durch die Gebäudeklimatisierung – prozentuale Werte (Variante 1 = 100%).....	B-10
Abbildung 53: Vergleich der Versorgungsszenarien hinsichtlich der CO <sub>2</sub> -Emissionen durch die Gebäudeklimatisierung – prozentuale Werte.....	C-11

# 1 Zusammenfassung

Für das Projekt Klimahaus® Bremerhaven 8 °Ost wurde von Transsolar ein Konzeptentwurf zur Gebäudeklimatisierung auf dem seinerzeit vorliegenden Projektstand (September 2003) ausgearbeitet und dokumentiert. Es handelt sich bei diesem Projekt um ein außergewöhnlich komplexes Bauvorhaben, sowohl im Hinblick auf das Gebäude selbst wie auch hinsichtlich der Nutzung mit teilweise extremen Nutzungsanforderungen. Ziel dieses Vorhabens war es, ausgehend von dieser Basis innerhalb des Planungsteams integrale (d.h. gewerkeübergreifende) Konzepte für die Gebäudeklimatisierung und den Betrieb des Gebäudes zu entwickeln und daraus innovative Energieversorgungskonzepte abzuleiten und umzusetzen.

Kern der Arbeit war die systematische Konzeption des Planungsprozesses mit den Schwerpunkten:

- Systematische Analyse der Planungsgrundlagen, d.h. der Nutzung und Nutzungsanforderungen
- Detaillierte Ermittlung und Bewertung des Energiebedarfs und seiner Struktur
- Entwicklung integraler Konzepte zur Gebäudeklimatisierung, d.h. Identifikation, Analyse und Bewertung möglicher Synergien aus Mehrfachnutzung von Bauteilen und gewerkeübergreifender Verknüpfung von technischen Maßnahmen
- Entwicklung innovativer Energieversorgungskonzepte für die gezielte Nutzung regenerativer Energieträger und der Einsparung von Primärenergie

Es konnte gezeigt werden, dass eine eingehende und kritische Analyse der Nutzung und Anforderungen und den damit verbunden Ansätzen bezüglich des Energiebedarfs eine Schlüsselaufgabe darstellt, die eine Integration natürlicher bzw. natürlich unterstützter Klimakonzepte oft erst ermöglichte. Wie in vielen anderen Ausstellungsgebäuden bzw. Freizeiteinrichtungen dominieren die elektrischen und damit internen Wärmelasten das energetische Geschehen und sorgen für ganzjährigen Kühlbedarf. Durch die systematische Überarbeitung der internen Lasten mit den beteiligten Fachplanern konnten der Kältebedarf gegenüber dem Stand Oktober 2003 um ca. 50% reduziert werden.

Für die Ausstellungsbereiche (Elemente, Perspektiven und Zentralbereich) konnte der mechanische Anteil der Kälte zunächst etwa um den Faktor 4 reduziert werden. In der weiteren Planung wurde für diese Gebäudeteile das Klimakzept weiterentwickelt, so dass diese Gebäudeteile vollständig ohne den Einsatz mechanischer Kälteerzeugung auskommen und das natürliche Kühlpotential des Standortes (z.B. über Energiepfähle) maximal ausgenutzt wird.

Am Standort verfügbare Fernwärme aus einem Müllheizkraftwerk deckt den Wärmebedarf und wird darüber hinaus gezielt zur Kühlung einzelner Gebäudebereiche über eine Absorptionskältemaschine und ein Desiccant Cooling System genutzt.

In der Summe werden nach heutigem Kenntnisstand durch die gewählte Energieversorgung die Emissionen auf ca. 5,6% der Referenzsysteme reduziert. Diese Zahl stellt ein Ergebnis dar, mit dem das Klimahaus seinem hohen Anspruch an die eigenen Maßstäbe gerecht wird.

Insgesamt zeigte sich, wie wichtig es für den Erfolg der integralen Planung ist, den begonnenen Prozess von der Konzeptplanung über die Definition der konkreten Ausführung bis

zur Umsetzung kontinuierlich zu verfolgen. Auch lohnt es sich innerhalb dieses Prozesses die Planung der „standardmäßigen“ Haustechnikkonzepte im Auge zu behalten.

Zur Ermittlung des tatsächlichen Energiebedarfs und zur abschließenden Bewertung der Konzepte empfiehlt sich ein Monitoring bzw. zumindest die systematische Erfassung und Auswertung des realen Betriebs des Gebäudes.

Das Vorhaben wurde in Kooperation zwischen Petri & Tiemann GmbH als Antragsteller in Zusammenarbeit mit der BEAN Bremerhavener Entwicklungsgesellschaft Alter/Neuer Hafen mbH & Co. KG und Transsolar Energietechnik GmbH als Auftragnehmer durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az. 26326-25 sowie der Bremer Energie-Konsens GmbH gefördert.

## 2 Einleitung

Mit dem Klimahaus Bremerhaven 8° Ost wurde 2009 in Bremerhaven eine einzigartige Erlebnisausstellung fertig gestellt, die mit inhaltlich hohem Anspruch das Themengebiet „Klima“ für die Allgemeinheit nicht nur leicht verständlich, sondern gleichzeitig auch konkret erlebbar machen soll. 600.000 Besucher jährlich erleben eine faszinierende Reise entlang des 8. Längengrades und erfahren in aufwendig gestalteten Rauminszenierungen, wie sich das Leben an unterschiedliche Klimazonen angepasst hat. Vielfältige Medien vermitteln hautnah die einfachen Prinzipien und komplexen Zusammenhänge von Klima- und Wetterphänomenen. Das Klimahaus Bremerhaven 8° Ost bietet aufgrund seiner thematischen und didaktischen Ausrichtung die einmalige Chance, verschiedene Fragestellungen rund um die Themen Umweltschutz, Klimaveränderung und nachhaltige Energieversorgung zu verschmelzen und schlägt so eine Brücke zwischen globalen Prozessen, technischen Lösungen und dem eigenen Handlungsbewusstsein des Besuchers. Das komplexe Bauvorhaben stellt somit auch besondere Anforderungen an das Energieversorgungskonzept.

Aus den Projektmitteln konnte im Vorfeld des Förderprojekts ein Konzeptentwurf erarbeitet und dokumentiert werden [1]. Wesentliche Arbeitsschwerpunkte waren:

- Unterstützung bei der Grundlagenermittlung, Ermittlung von realistischen Randbedingungen zu Nutzung, Raumbuch und Flächen, Besucherzahlen, sowie internen Lasten
- Analyse der zum Teil ungewöhnlichen klimatischen Anforderungen, Definition von Raumklimabedingungen und Technologien zur Versorgung
- intensive Diskussion der Abhängigkeiten zwischen internen Lasten, Bauweise und der Nutzungsmöglichkeit, regenerative Energiequellen zur Deckung heranzuziehen
- detaillierte Analyse der Energieverbräuche, Entwicklung von Energieversorgungskonzepten
- Entwicklung von alternativen Szenarien, Sensitivitätsanalyse
- Erarbeitung und Diskussion von Empfehlungen

Innerhalb der Bearbeitung wurden regelmäßig die konzept- und systemrelevanten Randbedingungen mit den beteiligten Fachplanern besprochen und der Einfluss auf die Nutzung regenerativer Energiequellen zur Bedarfsdeckung dargelegt. Z.B. wurde das erhebliche Potenzial einer über freie Kühlung betriebenen Bauteilaktivierung dargestellt und die Auswirkung auf andere Gewerke (Integration in die Planung der Statiker) sowie Einschränkungen (keine Abhängung der aktivierten Deckenteile) besprochen.

Im Verlauf der Entwurfsphase (HOAI Phase 3) hat sich gezeigt, dass die interessanten Ziele und die faszinierenden Möglichkeiten des Projekts Klimahaus aufgrund der komplexen Fragestellungen mit den in der HOAI üblichen Mitteln nicht befriedigend erreicht werden können.

Daher sollten auf Initiative des Betreibers Petri & Tiemann GmbH und in Zusammenarbeit mit der BEAN Bremerhavener Entwicklungsgesellschaft Alter/Neuer Hafen mbH & Co. KG sowie mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und der Bremer Energiekonsens die vorliegenden Ansätze weiterentwickelt und im Zuge einer integralen Planung zur Grundlage für eine ingenieurmäßige Haustechnik- und Energieversorgungsplanung werden. Damit soll dem inhaltlichen und ökologischen Anspruch des Klimahaus nachgekommen und ein Beispiel für anforderungsreiche Planungen für Besucherattraktionen dokumentiert

werden. Petri & Tiemann hat dazu in Zusammenarbeit mit der BEAN einen Förderantrag bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und der Bremer Energie-Konsens gestellt. Für die Konzeption wurde im Wesentlichen Transsolar Energietechnik GmbH beauftragt.

Als Zielsetzung des Vorhabens wurde in 2004 mit den Fördergebern vereinbart:

- Mit dem Klimahaus soll ein außergewöhnliches Edutainmentcenter gebaut werden, das einem hohen ökologischen Anspruch gerecht wird und das Vorbildcharakter in der Energieversorgung hat.
- Es sollen innovative Konzepte und Technologien eingesetzt werden, um das spektakuläre Ausstellungskonzept mit extremen klimatischen Erlebnissen für die Besucher zu ermöglichen.
- Es sollen weitgehend erneuerbare Energien zum Betrieb eingesetzt werden.
- Der Primärenergieverbrauch pro Besucher sowie die CO<sub>2</sub>-Emission für den Betrieb sollen so gering wie möglich sein.
- Es soll gezeigt werden, dass ein spektakuläres und energieintensives Erlebnis die Umwelt nicht speziell belasten muss.
- Der Mensch benötigt Energie nur mittelbar für seine Zwecke. Die Kunst besteht darin, die richtigen Energieträger und die richtige Energiequalität (Exergie) einzusetzen und den Primärenergieverbrauch zu reduzieren. Dies soll gezeigt werden.
- Sonne, Wind und Geothermie sind hochwertige erneuerbare Energieträger am Standort. Das Projekt soll die hohe Qualität und Verfügbarkeit regenerativer Energieträger nutzen und zeigen.
- Das Klimahaus soll eine sichere und wirtschaftliche Energieversorgung haben. Das letztendlich umgesetzte Energieversorgungskonzept soll dem Anspruch des gesamten Projektes gerecht werden.
- Integrale Planung für Gebäude mit Standardnutzung ermöglicht es, innovative und wirtschaftliche Konzepte zur Nutzung von regenerativen Energieträgern zu entwickeln. Das Projekt soll zu zeigen, dass ein integraler Planungsansatz auch und gerade bei komplexen Planungsaufgaben ein großes Optimierungspotential freisetzt.
- Das Projekt kann und soll als Beispiel und Muster für andere Projekte dienen, bei denen das Zusammenspiel von Attraktionsgestaltung und Energieversorgung eine integrale Planung erforderlich macht.

Schwerpunktmäßig sind folgende Arbeitsinhalte des Vorhabens zu nennen:

- Integrale Planung  
Aus zahlreichen Standardbauvorhaben liegen positive Erfahrungen damit vor, dass erfahrene Fachplaner durch eine integrale Planungsmethode gemeinsame Ziele im Planungsteam umsetzen können. Durch eine genaue Ermittlung der Planungsgrundlagen hinsichtlich des bezweckten Ziels (z.B. gewünschter Lichteindruck oder interne Last), eine Mehrfachnutzung von Bauteilen (z.B. statisch und thermisch) wie auch eine durchgängige gewerkübergreifende Verknüpfung von Maßnahmen (z.B. Fassadenöffnungen

für natürliche Lüftung, Nachluftspülung und Entrauchung) können sowohl Investitionskosten als auch Betriebskosten für Energie erheblich reduziert werden.

- Entwicklung innovativer Energieversorgungskonzepte  
Auf Basis eines zielgerichtet auf die Versorgung mit regenerativen Energie angelegten Gebäudes können innovative Energieversorgungskonzepte zur verstärkten Nutzung von Sonne, Wind, Geothermie und Abwärme sowie innovativer Technologien wie z.B. Sorptionstechnik entwickelt und bewertet werden.
- Überwachung der Umsetzung  
Hier geht es um die Mitwirkung bei der Erarbeitung von Vorlagen für die nach den öffentlich rechtlichen Vorschriften erforderlichen Genehmigungen oder Zustimmungen der für das Energiekonzept genehmigungspflichtigen Details für wesentliche Konzeptelemente. Es wird ein Anforderungskatalog aus dem Konzept und seiner Umsetzung in der Detailplanung mit allen Spezifikationen inklusive Steuerung und Regelung erstellt, der bindender Bestandteil in der Ausführungsplanung und Vergabe ist. Fachplaner und Architekten werden bezüglich Fragen der Bauausführung konzeptrelevanter Bauteile, Musterbeurteilung und bei der Abnahme von konzeptrelevanten Teilen beraten und unterstützt.
- Studie zur CO<sub>2</sub> Emission des Klimahaus  
Inhalt der Betrachtung ist die Emissionsbilanz des Klimahaus hinsichtlich der Emission von Treibhausgasen (am Beispiel von CO<sub>2</sub>) zu bewerten und in Relation zu der persönlichen Bilanz eines typischen Besuchers zu setzen. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sollen als Grundlagen für eine Vermittlung des Themas dienen und eine inhaltliche Brücke zwischen dem Energiekonzept und dem Besucher bzw. dem Besuch im Klimahaus bilden. Im Klimahaus können die Besucher an CO<sub>2</sub> Terminals ihr KlimaKonto eröffnen und ihre persönliche CO<sub>2</sub> Bilanz ermitteln. Im Ausstellungsbereich CHANCEN bietet sich den Besuchern darüber hinaus die Möglichkeit, spielerisch ihre CO<sub>2</sub> Bilanz zu verbessern und dabei Tipps für den Klimaschutz im Alltag mit nach Hause zu nehmen.
- Dokumentation der Ergebnisse  
Die Projektarbeit wird in den Medien, in Fachzeitschriften, Tagungsbeiträgen und Vorträgen der Öffentlichkeit dargestellt. Zudem wird das Energiekonzept mit einem Exponat im Foyer des Klimahauses dargestellt und so den Besuchern vermittelt.

Transsolar hat das Projekt seit der Wettbewerbsphase und Gewinn des Wettbewerbs im Frühjahr 2003 bis zur Fertigstellung in 2009 bearbeitet. Aus Planersicht sind als nennenswerte Einschnitte und veränderte Randbedingungen die neue Bauherren Vertretung und der fast vollständige Austausch des ursprünglichen Planungsteams (incl. Architekt und Haustechniker) zum Beginn der Ausführungsplanung (HOAI Phase 4) im Sommer 2005 zu nennen. Von Seiten der Aquarienplanung lagen zum Entwurf 2005 noch keine Planungsangaben vor, die berücksichtigt werden konnten. Des Weiteren haben in der Ausführung die Rückläufe hinsichtlich dessen was die anbietenden oder ausgewählten Firmen für technisch bzw. innerhalb des Baubudgets machbar hielten im Ergebnis konzeptionelle Änderungen erzwungen.

Es ist zu erwähnen, dass nicht alle für das Energie- und Komfortkonzept relevanten nach rein energietechnischen Erwägungen entschieden wurden. Das es trotz der langen Projektlaufzeit und zahlreicher Änderungen gelungen ist die wesentlichen Projektziele zu erreichen, ist u.a. dem engagierten Eintreten des Betreibers und des neuen Bauherrenvertreter zu verdanken. Durch die integrale Planung und Projektbegleitung bis zur Fertigstellung konnte

damit ein außergewöhnlich Komplexes Bauvorhaben umgesetzt werden, dass seiner Vorbildfunktion gerecht wird.

Eine erschöpfende Darstellung aller während der ausgedehnten Projektlaufzeit durchgeführten Planungsschritte und Arbeitsinhalte ist im Rahmen dieses Abschlussberichtes aufgrund des großen Umfangs nicht möglich. Daher werden an entsprechenden Stellen wichtige Arbeitsinhalte beispielhaft besprochen. Es existieren umfangreiche Berichte aus den verschiedenen Planungsphasen, in denen Einzelheiten dokumentiert sind (siehe Berichtverzeichnis). Die Darstellung in nachfolgenden folgt im Wesentlichen dem Ablauf der Planungs- und Bauphasen sowie den mit den Fördergebern vereinbarten Arbeitsschwerpunkten.

### **3 Integrale Planung: Klimakzept und Energieversorgung als Gesamtkonzept**

Wesentliches Kennzeichen der integralen Planung ist die strukturierte und umfassende (also gewerkeübergreifende) Analyse aller Einflussfaktoren auf das Planungsziel als Ausgangsbasis für die Konzeptentwicklung und die konsequente gegenseitige Abstimmung und Verzahnung der Konzeptinhalte während der einzelnen Planungsphasen.

In der Gebäudeenergieplanung kommt daher – speziell bei Sonderbauten – neben der üblichen Analyse der Standortbedingungen (Außenklima, Gebäudeorientierung, etc.) zunächst der kritischen Betrachtung der Nutzungs- und der Nutzungsanforderungen besondere Bedeutung zu. Auf dieser Basis werden dann passende Gebäude-Konzepte entwickelt, wobei das Augenmerk innerhalb dieses Prozesses bereits auf einer effizienten Integration der Energieversorgungsseite (der „Energiequellen“, z.B. Umweltenergien, Hoch- bzw. Niedertemperaturmedien) liegt. Die Auswahl und Bewertung der konkreten Energieversorgung erfolgt innerhalb des integralen Planungsprozesses stets in enger Abstimmung mit der Planung auf Seiten der Gebäudeklimakonzepte: Klimakzept und Energieversorgung stehen nicht getrennt voneinander; sie bilden ein gezielt aufeinander abgestimmtes Gesamtsystem.

Integrale Planung von Gebäudeklimakzepten bedeutet dabei, mögliche Synergien aus der Gebäudestruktur, der Bauweise, dem statischen Erfordernissen und anderen gebäudeseitigen Gegebenheiten zu erkennen, ggf. Anpassungen abzustimmen und in den Klimakzepten gezielt zu integrieren. Auch hierzu sollen im Folgenden einige Beispiele aus der Klimahaus-Planung beschrieben werden.

#### **3.1 Zusammenfassung, Stand der Vorarbeiten zum Projekt Beginn in 2004**

##### **3.1.1 Raumbuch (Stand Sept. 2003)**

Mit dem Konzeptentwurf Heizen/ Kühlen/Klimatisieren vom 15.9.2003 wurde von Transsolar ein erster Entwurf zum Raumbuch und Beschreibung der nutzungsbedingten Randbedingungen vorgelegt. Aufgrund Ermangelung an konsistenten Architekturplänen und Nutzungsbeschreibungen wurde das gesamte Bauvorhaben grob in Nutzungsbereiche zonierte. Der bereits stärker detaillierte Bereich der Reise wurde in 6 + 1 Zonen unterschieden und konnte raumweise erfasst werden.

Die in Planungsbesprechungen von den Ausstellungsplanern vorgestellten Ausstellungsideen und Exponatideen wurden für die unterschiedenen Bereiche und Zonen zusammengefasst und hinsichtlich klimatischer Anforderungen ergänzt.

Für die Reise wurden die Ausstellungsräume einzelnen Klimazonen zugeordnet und klimatische Zielbedingungen erarbeitet.

Die Zusammenstellungen wurden um vorhandene Angaben zu Personenbelegung, internen Lasten und Nutzung ergänzt. Wo Angaben fehlten wurden Annahmen getroffen und Vorgaben formuliert (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). In Abschnitt 3.1.2 ist die erarbeitete Beschreibung beispielhaft für Zone 1 (antarktischen Klima) gegeben.

Name für Zusammenfassung			maximal Anwesende Personen	Flächen	maximal anwesende Personen
<b>Reise</b>				5788 m <sup>2</sup>	1300 P.
	<b>Zone 01</b>	631 m <sup>2</sup>	111 P.		
	<b>Zone 02</b>	154 m <sup>2</sup>	32 P.		
	<b>Zone 03</b>	760 m <sup>2</sup>	182 P.		
	<b>Zone 04</b>	2339 m <sup>2</sup>	644 P.		
	<b>Zone 05</b>	110 m <sup>2</sup>	95 P.		
	<b>Zone 51</b>	1288 m <sup>2</sup>	142 P.		
	<b>Zone 06</b>	506 m <sup>2</sup>	95 P.		
<b>Ausstellungsflächen</b>				5214 m <sup>2</sup>	1584 P.
	Elemente	2500 m <sup>2</sup>	710 P.		
	Perspektiven	1600 m <sup>2</sup>	592 P.		
	Wechselausstellung	917 m <sup>2</sup>	140 P.		
	Multifunktionsraum	197 m <sup>2</sup>	142 P.		
<b>Zentrale Erschließung</b>				1711 m <sup>2</sup>	328 P.
	Erschließungsbereich incl.:	1600 m <sup>2</sup>	238 P.		
	Foyer	0 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Kassenzone	0 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Garderobe Schulklassen	0 m <sup>2</sup>	30 P.		
	Garderobe	0 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Einführung Schulklassen, Theater	111 m <sup>2</sup>	60 P.		
<b>Shop</b>				230 m <sup>2</sup>	59 P.
	Showroom	60 m <sup>2</sup>	36 P.		
	Shop	170 m <sup>2</sup>	24 P.		
<b>Restaurant</b>				377 m <sup>2</sup>	118 P.
	Restaurant	287 m <sup>2</sup>	118 P.		
	Coffebar (in Reise enthalten)	0 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Küche	90 m <sup>2</sup>	0 P.		
<b>Büro</b>				814 m <sup>2</sup>	65 P.
	Schullabor	54 m <sup>2</sup>	30 P.		
	Gastro Office	15 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Erste Hilfe Raum	15 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Sozialräume mit Toilette	134 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Server	18 m <sup>2</sup>	0 P.		
	ZBVII	48 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Büros	386 m <sup>2</sup>	35 P.		
	Besprechungsraum	65 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Werkstatt	79 m <sup>2</sup>	0 P.		
<b>Sonst</b>				2379 m <sup>2</sup>	99 P.
	Dachterrasse (nicht berücksichtigt)	700 m <sup>2</sup>	59 P.		
	Lager Küche	50 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Getränkeller	30 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Lager Shop	30 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Toiletten	165 m <sup>2</sup>	40 P.		
	Stuhllager	25 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Teeküche	20 m <sup>2</sup>	0 P.		
	MA. Toiletten	40 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Materiallager	60 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Mehrwecklager	93 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Aquarienlager	25 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Futterküche	22 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Quarantäne	215 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Aquarientechnik	412 m <sup>2</sup>	0 P.		
	Haustechnik	1192 m <sup>2</sup>	0 P.		
	<b>Summe</b>	<b>17213 m<sup>2</sup></b>	<b>3554 P.</b>	<b>16513 m<sup>2</sup></b>	<b>3554 P.</b>

Tabelle 1: Flächen- (Stand 2.7.2003) und Personenübersicht (Stand 25.7.2003) Klimahaus

Raumname	Kurzbeschreibung	Länge	Breite	Höhe	0	gesamt m²	gesamt m³	Anz. Räume	max. gleichz. Anw. Gäste	durchschn. Aufenth. Dauer	Temp.	rel. Luftf.	Wind	Klimazone	Fläche pro Person
<b>REISE 1</b>															
10 PRO	0 Einströmung Reise	16 m	6 m	4 m	0	98 m²	392 m³	1	50 P.	6 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	2,0
20 BRE-SCH	0 Reise Breitenhaven Schweiz, Bahndamm (alt)	8 m	16 m	4 m	0	126 m²	504 m³	1	50 P.	6 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	2,5
30 SCH	0 Schweiz-Gebäude mit Gletscher	4 m	30 m	8 m	0	182 m²	1456 m³	1	50 P.	9 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	3,6
40 SCH-SAR	0 Vertiefungsraum mit Gletscher	7 m	18 m	4 m	0	30 m²	120 m³	5	40 P.	0 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	0,8
50 SAR	0 Reise nach Sardinien, Sesselift	11 m	9 m	6 m	0	100 m²	378 m³	1	40 P.	5 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	2,5
60 SAR-NIG	0 Sardinien-Mikroklima mit Vertiefungszonen (5)	5 m	7 m	6 m	0	36 m²	600 m³	6	40 P.	5 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	0,9
70 SAR-NIG	0 Reise in den Niger (Tunnel)	6 m	20 m	5,7 m	0	116 m²	661 m³	1	30 P.	3 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	3,9
71 NIG	0 Niger Schlucht	10 m	22 m	6 m	0	214 m²	1284 m³	1	40 P.	2 min.	35 Grad rocken	%	jähleicht	6	7,1
72 NIG	0 Hautraum	15 m	20 m	10 m	0	292 m²	2920 m³	1	40 P.	7 min.	35 Grad rocken	%	nein	6	7,3
80 NIG-ÄQU	0 Niger, Karmen zur Vertiefung	0 m	1 m	0 m	0	0 m²	0 m³	10	50 P.	9 min.	35 Grad	<5 %	nein	6	0,0
90 ÄQU	0 Reise Niger Äquatorialguinea mit Jeep	5 m	8 m	11,7 m	0	38 m²	445 m³	2	50 P.	6 min.	30 Grad	norm. %	nein	5	0,8
91 ÄQU	0 Äquatorialguinea, Regenwald bei Nacht	11 m	19 m	5,7 m	0	213 m²	1214 m³	1	30 P.	6 min.	27 Grad	>80 %	nein	51	7,1
93 ÄQU	0 Äquatorialguinea, Regenwald bei Nacht	12 m	28 m	6 m	0	348 m²	2088 m³	4	20 P.	6 min.	30 Grad	>80 %	nein	51	17,4
100 ÄQU-ANT	0 Schiff im Regenwald	0 m	1 m	0 m	0	0 m²	0 m³	1	50 P.	9 min.	<30 Grad	norm. %	nein	5	0,0
101 ÄQU-ANT	0 Café auf dem Schiff	9 m	8 m	8,5 m	0	72 m²	612 m³	1	20 P.	1 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	1,0
102 ÄQU-ANT	0 Schiff in der Antarktis	9 m	8 m	8,5 m	0	72 m²	612 m³	1	20 P.	1 min.	<10 Grad	norm. %	ja/mäßig	2	3,6
110 ANT	0 Antarktis, Gletscherspalte	83 m	3 m	5 m	0	250 m²	1250 m³	1	50 P.	8 min.	<0 Grad	norm. %	nein	1	5,0
111 ANT	0 Hauptraum Antarktis	19 m	18 m	9 m	0	350 m²	3150 m³	1	30 P.	3 min.	<0 Grad	norm. %	ja/mäßig	1	11,7
112 ANT	0 Vertiefung Antarktis	0 m	2 m	0 m	0	0 m²	0 m³	10	30 P.	6 min.	<0 Grad	norm. %	nein	1	0,0
120 ANT-ATM	0 Reise in die Atmosphäre, Ballonfahrt	5 m	6 m	10 m	0	31 m²	310 m³	1	30 P.	3 min.	<0 Grad	norm. %	ja/mäßig	1	1,0
<b>REISE 2</b>															
130 ATM	0 Atmosphäre Nacht	6 m	70 m	6 m	0	402 m²	2412 m³	1	40 P.	3 min.	norm. Grad	norm. %	nein	4	10,1
131 ATM	0 Atmosphäre Wolken	10 m	28 m	6 m	0	289 m²	1734 m³	1	40 P.	7 min.	norm. Grad	100 %	nein	51	7,2
140 ATM-SAM	0 Weg in den Regenwald auf Samoa	6 m	5 m	6 m	0	28 m²	168 m³	1	30 P.	2 min.	30 Grad	>80 %	nein	51	0,9
150 SAM	0 Regenwald Samoa	9 m	40 m	7 m	0	346 m²	2422 m³	1	30 P.	4 min.	30 Grad	>80 %	nein	51	11,5
151 SAM	0 Regenwald Samoa Vertiefungszonen	0 m	3 m	0 m	0	0 m²	0 m³	3	20 P.	4 min.	30 Grad	>80 %	nein	51	0,0
152 SAM	0 Strand in Samoa	5 m	12 m	8 m	0	64 m²	512 m³	1	10 P.	2 min.	30 Grad	>80 %	nein	51	6,4
153 SAM	0 Saunriff	5 m	16 m	8 m	0	80 m²	640 m³	1	30 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	2,7
154 SAM	0 Kante vom Saunriff	17 m	26 m	6 m	0	434 m²	2604 m³	1	30 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	14,5
155 SAM	0 Fahrt in die Tiefsee	4 m	4 m	8 m	0	14 m²	112 m³	1	20 P.	2 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	0,7
156 SAM	0 Von der Tiefsee an die Oberfläche	9 m	18 m	6 m	0	165 m²	990 m³	1	20 P.	4 min.	<16 Grad	norm. %	nein	3	5,5
160 SAM-ALA	0 Pazifischer Ozean	2 m	40 m	5 m	0	97 m²	485 m³	1	30 P.	4 min.	norm Grad	norm. %	nein	3	4,9
161 SAM-ALA	0 Alaska	3 m	28 m	8 m	0	83 m²	415 m³	1	40 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	nein	3	2,1
170 ALA	0 Alaska, Vertiefungszonen	12 m	22 m	8 m	0	262 m²	2096 m³	1	30 P.	4 min.	<15 Grad	norm. %	nein	3	8,7
171 ALA	0 Reise ins Wattenmeer, U-Boot bis	6 m	9 m	8 m	0	53 m²	424 m³	10	40 P.	8 min.	norm Grad	norm. %	nein	3	1,3
180 ALA-WAT	0 Reise ins Wattenmeer, unter dem Nord pol,	3 m	6 m	6 m	0	18 m²	108 m³	1	40 P.	4 min.	<18 Grad	norm. %	nein	3	4,9
181 ALA-WAT	0 Reise ins Wattenmeer, unter dem Nord pol,	6 m	14 m	6 m	0	82 m²	415 m³	1	30 P.	4 min.	<15 Grad	norm. %	nein	3	2,7
182 ALA-WAT	0 Wattenmeer evtl in Komb. mit Hoo ge	6 m	10 m	6 m	0	82 m²	424 m³	1	30 P.	4 min.	norm Grad	norm. %	nein	3	2,7
183 ALA-WAT	0 Wattenmeer evtl in Komb. mit Hoo ge	6 m	10 m	6 m	0	82 m²	424 m³	1	30 P.	4 min.	norm Grad	norm. %	nein	3	2,7
190 WAT	0 Wattenmeer evtl in Komb. mit Hoo ge	11 m	6 m	6 m	0	55 m²	330 m³	1	40 P.	2 min.	norm Grad	norm. %	ja/stark	2	4,1
200 HOO	0 Wattenmeer evtl in Komb. mit Hoo ge	10 m	13 m	6 m	0	132 m²	792 m³	1	20 P.	4 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	1,8
201 HOO	0 Wattenmeer evtl in Komb. mit Hoo ge	5 m	10 m	6 m	0	50 m²	300 m³	8	30 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	nein	4	4,4
210 HOO-BRE	0 Bremerhaven Hauptraum	6 m	14 m	6 m	0	84 m²	504 m³	1	50 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	teilw.	4	1,7
220 BRE	0 Bremerhaven Vertiefungszonen	13 m	7 m	6 m	0	89 m²	534 m³	1	40 P.	6 min.	norm Grad	norm. %	leicht	4	2,2
221 BRE	0 Bremerhaven Vertiefungszonen - entfällt	6 m	8 m	6 m	0	49 m²	294 m³	4	32 P.	6 min.	teilw. Grad	norm. %	teilw.	4	1,5
221 BRE	0 Bremerhaven Vertiefungszonen - entfällt	0 m	1 m	0 m	0	0 m²	0 m³	0	32 P.	6 min.	teilw. Grad	norm. %	teilw.	4	0,0
<b>Summe Reise 1</b>															
		0	0	0	0	3022 m²	19244 m³	45	794 P.	116 min.					115 m²/person
<b>Summe Reise 2</b>															
		0	0	0	0	2766 m²	18823,9 m³	53	850 P.	115 min.					10,1
<b>Summe Reise</b>				0	0	5788 m²	38068 m³	98	1644 P.	231 min.					11,5

Tabelle 2: Flächenübersicht Reise mit Zuordnung der Räume und Personen zu 6 +1 klimatischen Zonen (Stand: 4.7.2003) (Personen Angaben nach Angaben des Ausstellungsplaners Kunstraum (KR))

### 3.1.2 Randbedingungen, Beispiel Zone 1 (Stand Sept. 2003)

#### Raumklima

- Beschreibung: antarktisches „Sommer-Klima“, kalt, trocken, operative Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes
- Raumtemperatur:  $-6\text{ °C} < T < -4\text{ °C}$
- Raumlufffeuchte:  $5\% < r.F. < 70\%$
- keine „Nachtabenkung“
- Besonderheit: Bodenfläche zu 90% eisbedeckt

#### Räume

- Räume: siehe Tabelle 2
- Flächen: ca. 630 m<sup>2</sup>
- Raumvolumen: ca. 4700 m<sup>3</sup>
- Personenzahl: max. gleichzeitig anwesende Personen 111 (nach KR: 140)
- durchschnittliche Aufenthaltsdauer: 20 Minuten
- interne elektrische Lasten bei Betrieb: 65 W/m<sup>2</sup>
- interne Feuchtequellen: Personen, nur seltene Erneuerung der Eisflächen
- kein Sonnenlicht in Zone
- Raumumschließungsflächen wärmegeämmt, mittlerer u-Wert = 0.23 W/m<sup>2</sup>K
- Boden wärmegeämmt, u-Wert = 0.23 W/m<sup>2</sup>K
- Decke, u-Wert = 0.23 W/m<sup>2</sup>K
- Zone ist thermisch isoliert, kein Luftaustausch mit Nachbarzonen
- Zone schließt an: Binnenraum, Restaurant, R51
- Luftschleusen: nicht untersucht
- Dampfsperre in Umschließungsflächen

#### Klimatechnik/Konzept

- mechanische Lüftung, Zuluft entfeuchtet und gekühlt
- Feuchte und Wärmerückgewinnung
- kontinuierliche Luftentfeuchtung über flüssige Sorptionssysteme, ohne Vereisung
- Zulufttemperatur: ca. 5 K unter Zonentemperatur
- Frischluft-LW entsprechend 30 m<sup>3</sup>/h Person
- Volumenstrom max.: 3300 m<sup>3</sup>/h
- Strahlungs- und Konvektionskühlung über Eisfläche
- druckverlustarme Umluftkühlung zur Deckung der hohen internen Lasten
- Versorgungstemperatur Kälte: - 12 °C

#### Bemerkung

- Die Raumklimabedingungen sind extrem für die Besucher bei einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer von 20 min.
- Aufgrund der hohen internen elektrischen Lasten wird trotz der aktiven Kühlung der Eisfläche eine Umluftkühlung benötigt.
- Eine Beheizung zum Schutz der Gebäudesubstanz gegen Einfrieren wurde nicht berücksichtigt.

### 3.1.3 Energetische Gebäude Zonierung (Stand Sept. 2003)

Für die klimatechnische Charakterisierung des Gebäudes und energetische Bewertung mittels dynamischer thermischer Simulation mit TRNSYS ergaben sich somit insgesamt 11 Zonen mit 7 unterschiedlichen Zonen innerhalb der Reise. Zur Erfassung weiterer relevanter Randbedingungen wurden darüber hinaus noch drei zusätzliche Zonen modelliert: Binnenzone, Fassadenzone und Technikbereiche.

Die Binnenzone (Kellergang, Fassadenraum) stellt einen Pufferraum zwischen Fassadenraum und den Nutzräumen des Klimahauses dar. Der Binnenraum ist nicht beheizt oder gekühlt. Der Fassadenraum wurde in der Simulation berücksichtigt aber weder beheizt noch gekühlt sondern nur bei Bedarf (solare Überhitzung) natürlich durchlüftet. In Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für Vorgaben für die energetische Ausführung der Gebäudehülle.

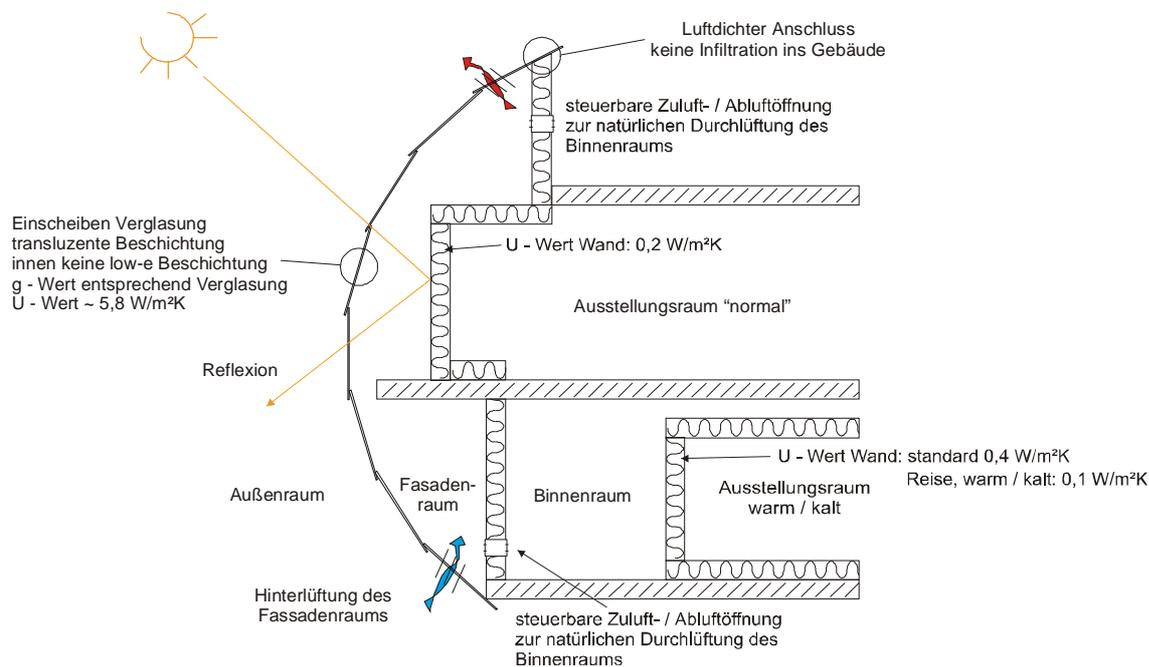


Abbildung 1: Schematischer Schnitt durch die Gebäudehülle, Zonenwände, Stand 15.9.2003.

### 3.1.4 Definition der Klimabedingungen in der Reise (Stand Sept. 2003)

Die vom Ausstellungsplaner vorgesehenen unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Verlauf der Reise wurden in übergeordnete Zonen 1 bis 6 unterteilt. Eine weitere Anpassung kann durch Nachbefeuchtung (Zone 51) bzw. durch Nacherwärmung erfolgen. Einige Räume hatten klimatechnische Besonderheiten, die durch entsprechende lokale Maßnahmen hätten hergestellt und erhalten werden müssen, wie z. B. Schneetreiben, Wind, der Gletscher in der Schweiz, die Wolke usw.. Diese „Besonderheiten“ waren in Planungsbesprechungen erwähnt lagen aber nicht als Anforderungskatalog vor und wurden als Exponate betrachtet.

Ziel der Zonenkonditionierung ist die Erhaltung der gewünschten Raumtemperaturen und -feuchten unter Berücksichtigung der mittleren internen Lasten, Transmissionsgewinnen und -

verlusten, sensiblen und latenten Lasten aufgrund der Besucher sowie der zu Frischluftversorgung benötigten Außenluftmengen.

Der Vergleich mit den Außentemperaturen und Feuchten in Bremen zeigt, dass im Bereich der Reise, mit Ausnahme der Zone 4, Klimakonzepte mit natürlicher Kühlung nicht einsetzbar sind (vergleiche Abbildung 2).

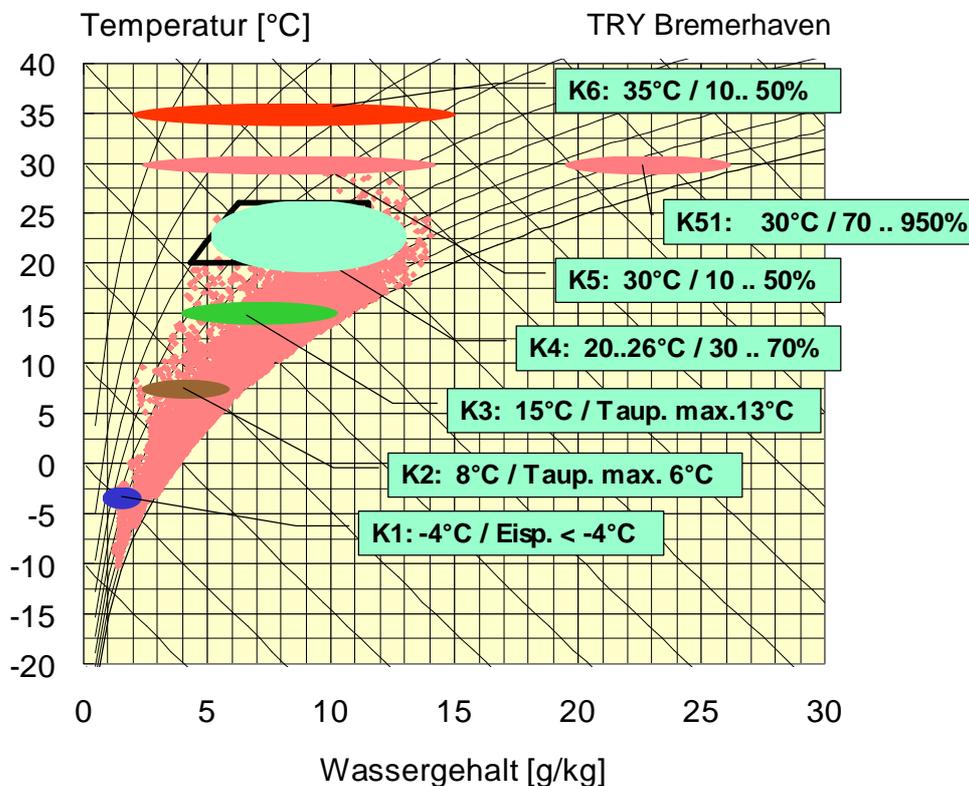


Abbildung 2: Übersicht im  $h,x$  Diagramm mit Definition der Temperaturen und Feuchte in den Klimazonen 1 bis 6 der Reise. Hinterlegt sind die Außenluftzustände TRY Bremerhaven (8760 Datenpunkte), Stand 15.9.2003.

### 3.1.5 Besucherprofil und Betriebszeiten (Stand Sept. 2003)

Für die dynamische Bewertung in stündlicher Auflösung wurden die vom Betreiber vorgegebenen Besucherzahlen und Zeitprofile herangezogen. Diese unterscheiden nach Haupt-, Zwischen- und Nebensaison sowie nach Wochentag und Tageszeit. Das verwendete Besucherprofil wurde folgendermaßen konstruiert:

**Maximale Besucherzahl:** An einem Spitzentag in der Hauptsaison wurde von einer maximalen Anzahl von 3553 gleichzeitig anwesenden Besuchern ausgegangen. Dieser Wert entspricht der Maximalbelegung im gesamten Klimahaus und wurde zur Auslegung der Lüftungsanlagen verwendet.

**Aufteilung auf Flächen:** In der Simulation wurden 11 thermisch unterschiedliche Zonen unterschieden. Die maximale Besucherzahl wurde nach dem Schlüssel in Tabelle 1 auf diese Zonen aufgeteilt.

**Besucherprofil:** Um eine Mischung aus Maximalwerten und Durchschnittswerten in die Simulation einfließen zu lassen wurden zur Ermittlung der stündlich anwesenden Besucher

(Besucherprofil) monatsweise ein typischer Tagesgang nach Vorgaben des Betreibers verwendet. Die Maximalwerte für gleichzeitig anwesende Besucher werden dabei nur an wenigen Stunden erreicht, explizit samstags nachmittags zwischen 15 und 16 Uhr. Spitzen- und Durchschnittswerte wurden angepasst durch eine Korrektur der Besucherzahlen an den Wochentagen auf 60% nach unten, so dass, bei einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer von ca. 4,5 h die Annahmen mit einer jährlichen Besucherzahl von ca. 600'000 korrespondieren.

**Öffnungszeiten:** Für alle Zonen innerhalb des Klimahauses wurden einheitlich die Betriebszeiten zu 7 Tage die Woche, täglich von 9 bis 18 bzw. 19 Uhr (saisonabhängig, 10 bis 19 Uhr am Wochenende) angenommen. Die internen Lasten fallen zu dieser Zeit an. Die Personen werden nach dem Besucherprofil angenommen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4).

**Betriebszeiten Lüftung:** Die mechanische Lüftung ist nur bei Anwesenheit der Besucher in Betrieb. Es wird nur an/aus unterschieden. Die jeweils zugrunde gelegten RLT Systeme sind zonenweise beschrieben (siehe Beispiel für Zone 1 in Abschnitt 3.1.2).

### 3.1.6 Wärmeabgabe des Menschen

Typischerweise beträgt die Wärmeabgabe eines normal bekleideten Menschen bei leichter Tätigkeit ca. 120 W. Während für Lufttemperaturen zwischen 10 und 32 °C die Summe in erster Näherung gleich bleibt, gibt er einen veränderlichen Teil davon als sensible und als latente Wärme ab.

In der VDI 2078 finden sich Angaben zur sensiblen und latenten Wärmeabgabe des Menschen für Lufttemperaturen zwischen 18 und 26 °C und unterschiedlichen Aktivitätsgrad. In Anlehnung daran wurden für die Zonen mit unterschiedlichen Raumkonditionen die folgenden Annahmen zu Wärmeabgabe des Menschen getroffen.

	1	2	3	32	4	41	5	51	6
	Antarktis	Schweiz	Atmosphäre		Bremerhaven		Äquatorial-guinea		Niger
	-4°C	8°C	15°C	15°C	20°C	20°C	30°C	30°C	35°C
sensibel, W	136	136	110	110	80	80	47	47	20
latent g/h	30	30	30	30	70	70	100	100	120

*Tabelle 3: Annahmen zu Wärmeabgabe des Menschen in den verschiedenen Zonen*

Es wurde dazu weiter angenommen, dass die Besucher im Klimahaus typischerweise normal gekleidet sind. In der kalten Zonen 1 beträgt die Aufenthaltsdauer am Stück z. Zt. ca. 20 min. Da dies den Wärmehaushalt der Besucher stark belastet, wurde hier angenommen, dass in dieser Zone die Besucher sich durch zusätzliche Bekleidung schützen können und dadurch die sensible Wärmeabgabe nicht weiter zunimmt.

Besucherprofil Klimahaus, Stand 25.07.03

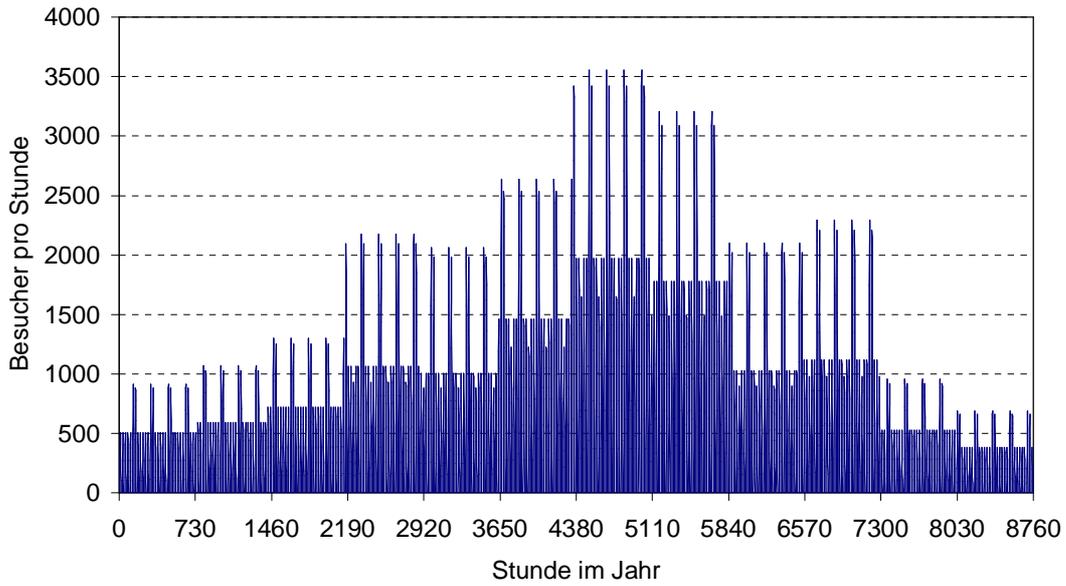


Abbildung 3: Besucherprofil Klimahaus, Jahresübersicht

Besucherprofil Klimahaus, Stand 25.07.03

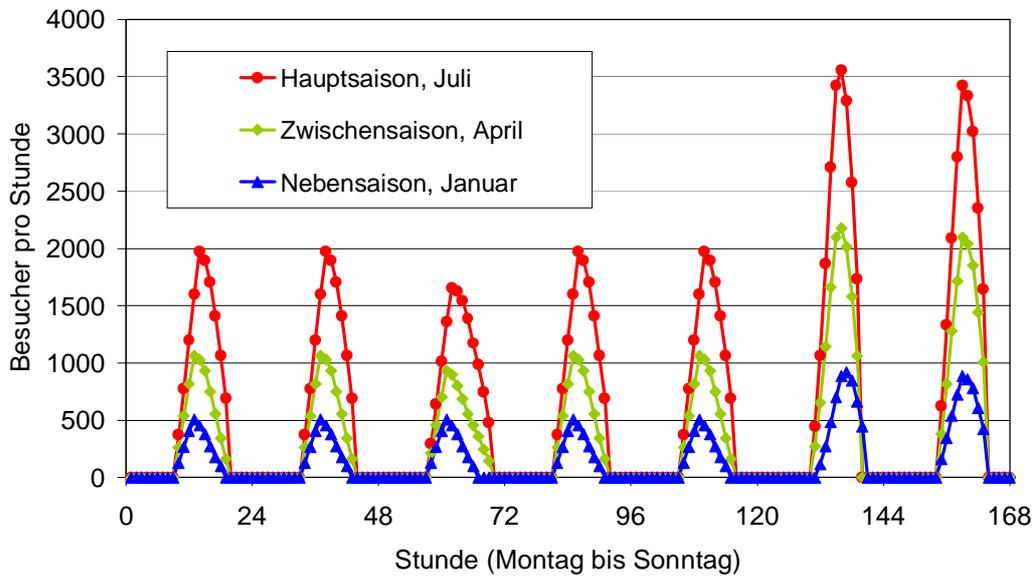


Abbildung 4: Besucherprofil Klimahaus, Beispiel je eine Woche pro Saison.

## 3.2 Wesentliche Elemente der Konzept-Planung für die Gebäudeklimatisierung

Ausgehend von den beschriebenen Vorarbeiten aus 2003 wurden die vielseitigen gebäude- und nutzungsspezifischen Randbedingungen in 2004 einer kritischen Überarbeitung und detaillierten Aktualisierung unterzogen mit dem Ziel, eine verlässlichere Datenbasis für die Ermittlung des Gebäudeenergiebedarfs und die Entwicklung innovativer, natürlicher Klimakonzepte zu schaffen. Diese Überarbeitung bezog sich hauptsächlich auf die im Folgenden beschriebenen Bereiche.

### 3.2.1 Zonierung des Gebäudes

Für die Entwicklung geeigneter Klimakonzepte wurde das Gebäude anhand der aktualisierten Grundrisse in verschiedene Zonen mit vergleichbarer Nutzung und Anforderung unterteilt. Dabei wurde grundsätzlich unterschieden zwischen Gebäudeteilen, die dem Ausstellungsbereich „Reise“ zugeordnet sind, also teilweise extreme und sehr unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen in Bezug auf das Innenraumklima aufweisen (Z1 bis Z6) und den übrigen Zonen mit üblichen Raumklimaanforderungen, aber unterschiedlicher Nutzung bzw. räumlicher Anordnung.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5 bis Abbildung 9) sind in den Grundrissen der Ebenen +5.00 bis +20.20 die den jeweiligen Gebäudezonen zugeordneten Flächen farblich angelegt.

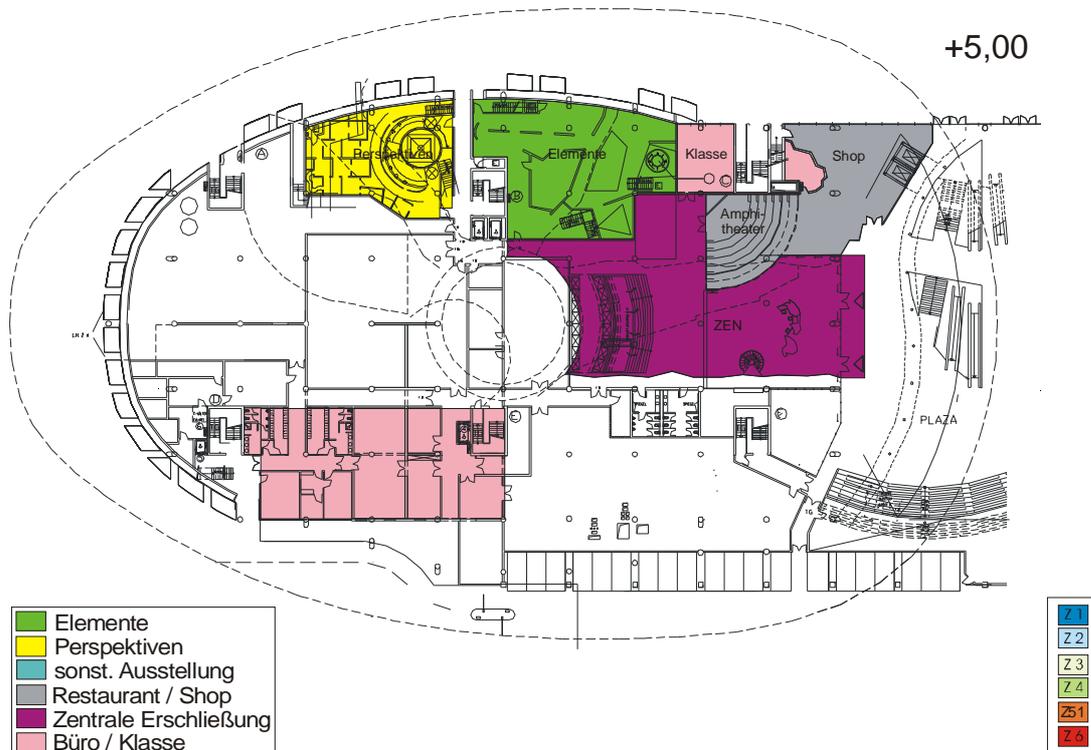


Abbildung 5: Schematische Zonierung Klimahauses Ebene +5.00

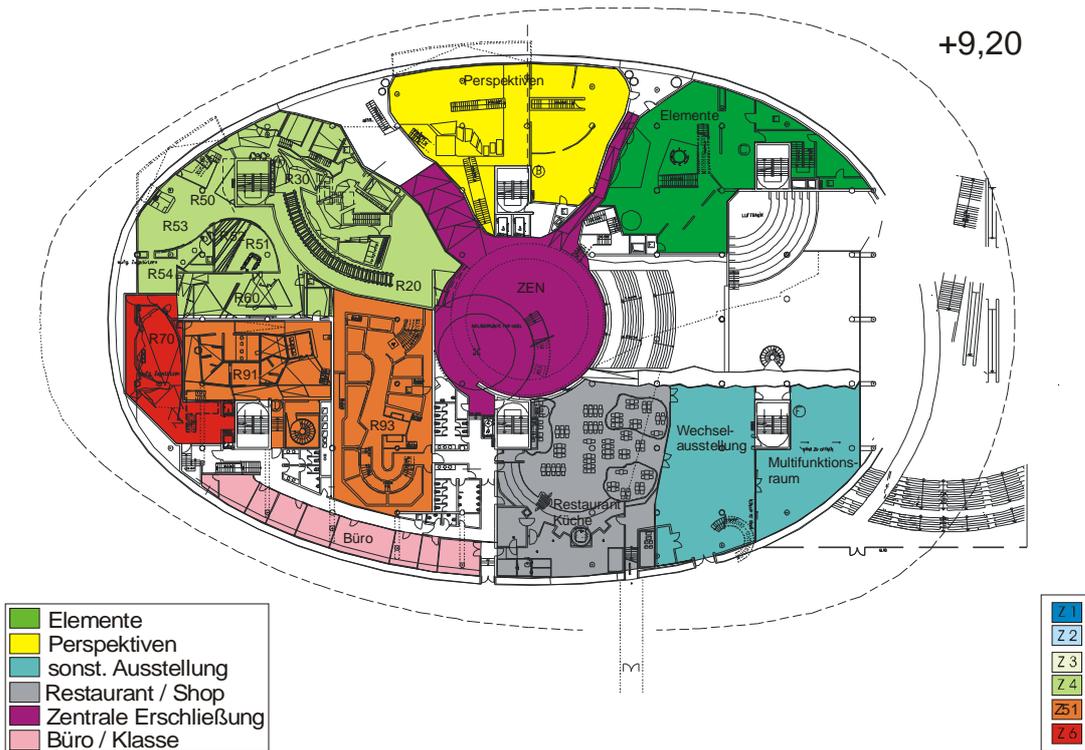


Abbildung 6: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +9.20

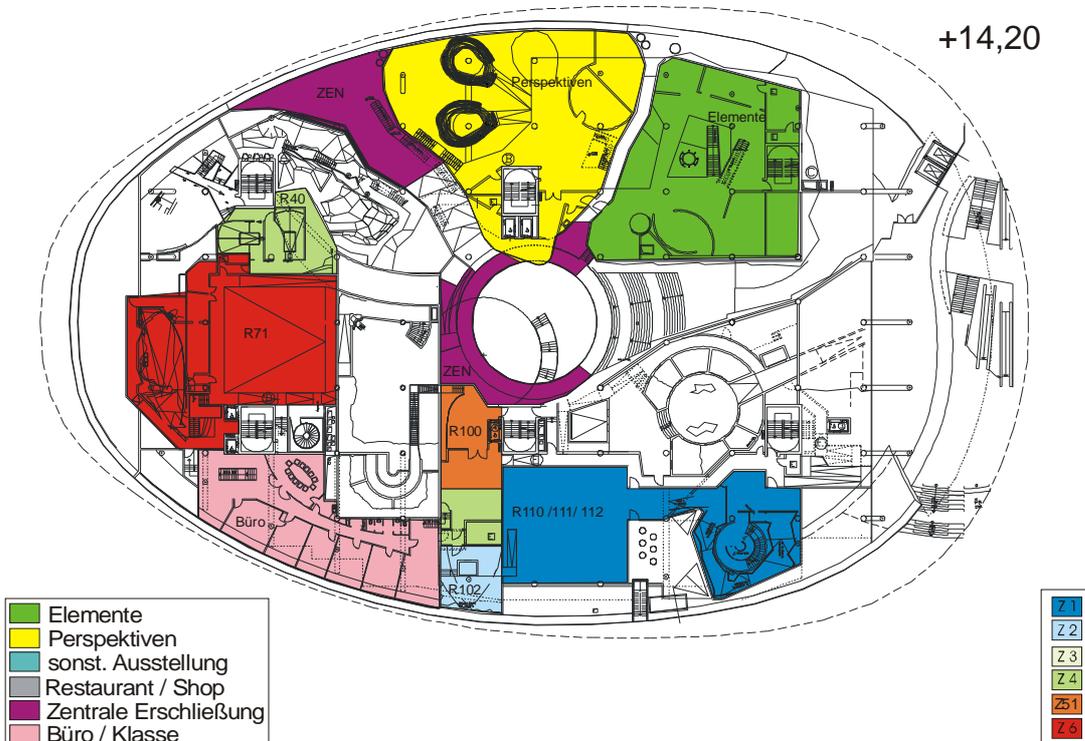


Abbildung 7: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +14.20

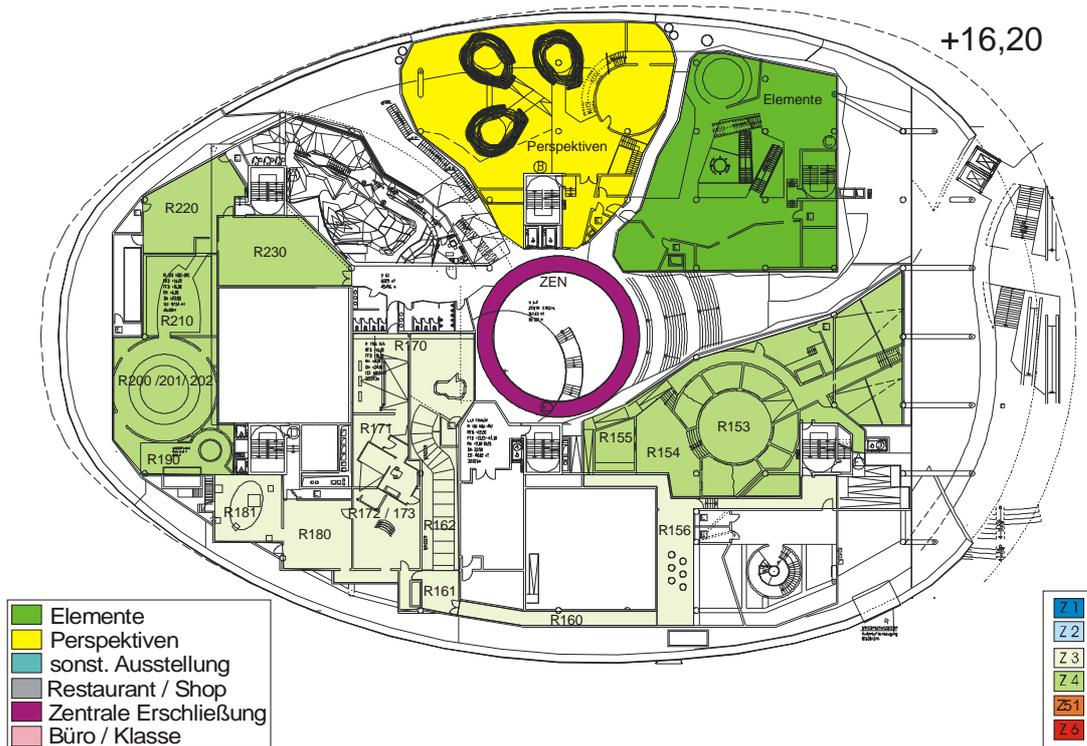


Abbildung 8: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +16.20

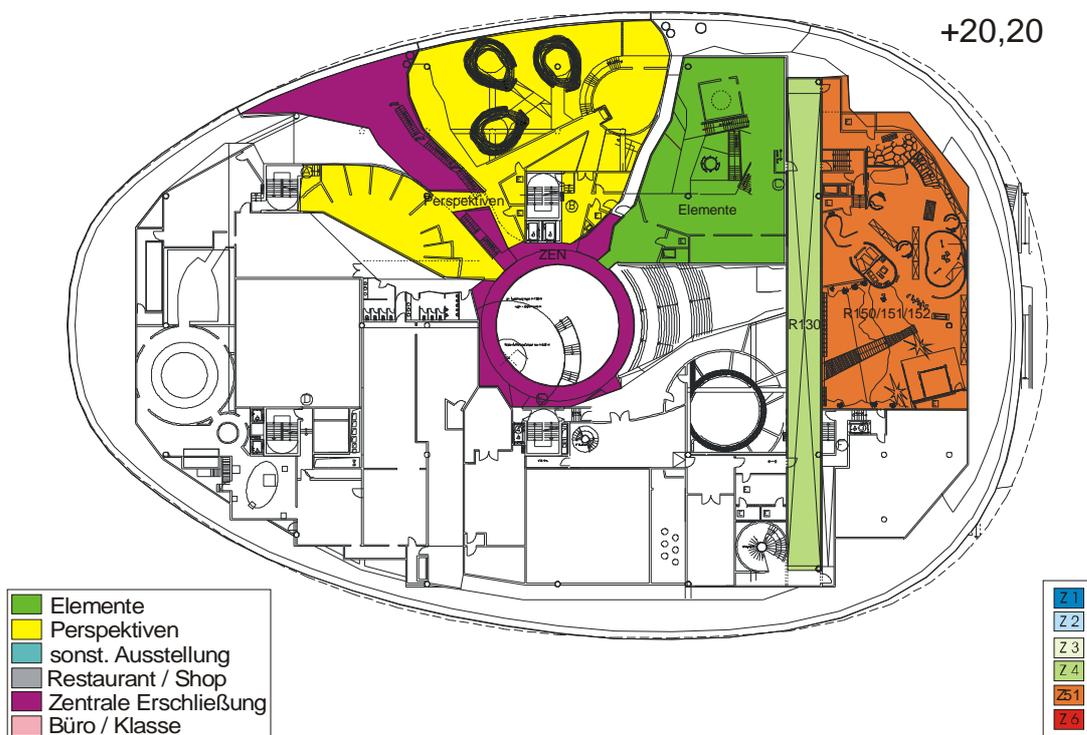


Abbildung 9: Schematische Zonierung Klimahaus Ebene +20.20

## 3.2.2 Analyse und Überarbeitung der Nutzungsanforderungen

### 3.2.2.1 Klimatische Anforderungen

Die Anforderungen an die Lufttemperatur in der Reise-Zone 1 (antarktisches Klima) wurde von -4 °C auf -2 °C (zeitweise möglich bis + 8 °C) angehoben.

In der Reise-Zone 3 (Tiefsee, Alaska, Wattenmeer) besteht nicht mehr der Anspruch, die Raumtemperatur gegenüber normalen Bedingungen (20-26 °C) abzusenken (auf vorher 16 °C). Damit entspricht diese Zone klimatisch der Reise-Zone 4 (Bremerhaven etc).

Für die Raumklimabedingungen der Ausstellungsbereiche „Elemente“ und „Perspektiven“ wurde die starre Temperaturobergrenze von 26 °C aufgehoben. Die Raumtemperaturen können hier – hauptsächlich abhängig von der Nutzungsintensität - nach oben gleiten (bis max. ca. 28 °C). Gleiches gilt für den Zentralbereich (Foyer, Zentrale Erschließung, Schluchten), wo die maximale Raumtemperatur aufgrund verglaster Bereiche nach außen auch von den solaren Lasten abhängt. Die detaillierte Abbildung dieser Bereiche in der dynamischen thermischen Simulation macht die zu erwartenden Temperaturen einer statistischen Auswertung zugänglich.

### 3.2.2.2 Wärmelasten

Besonders Augenmerk innerhalb des Planungsprozesses galt den internen Wärmelasten, die zum Stand vom September 2003 noch pauschal – größtenteils zu 65 W/m<sup>2</sup> – angenommen worden waren. Denn: Die Größe der internen Wärmelasten hat nicht nur einen direkten Einfluss auf den Kältebedarf, sondern beeinflusst auch die Möglichkeiten hinsichtlich des Klimakonzepts. Konstant hohe interne Wärmelasten erschweren häufig den Einsatz regenerativer Klimakonzepte bzw. machen den umfangreichen Einsatz mechanischer Kälte von vornherein nötig.

Die Wärmelasten wurden einzeln (d. h. exponat- und raumweise) analysiert und hinsichtlich ihrer Wärmewirksamkeit beurteilt. Prinzipiell ist die Wirksamkeit interner Wärmelasten zunächst als 1 (100 %) anzusehen, da die innerhalb des Gebäudes freigesetzte Wärme – unabhängig vom Ort der Entstehung und Art der Wärme – auch wieder aus dem Haus entfernt werden muss, wenn Temperaturobergrenzen eingehalten werden sollen. Dennoch müssen nicht alle Wärmequellen in gleicher Weise im Aufenthaltsbereich der Nutzer (Besucher) wirksam sein, wenn sie z. B. mit der Lüftung (über eine höhere nutzbare Temperaturdifferenz) direkt abgeführt werden können oder außerhalb der genutzten Räume anfallen, wo sie abgelüftet oder höhere Raumtemperaturen zugelassen werden können.

Folgende Werte wurden für die Wärmewirksamkeit verschiedener Lasten bezüglich des Aufenthaltsbereiches angesetzt:

- |   |           |
|---|-----------|
| - Beleuchtung (Lampen direkt unter der Decke):            | 0,6       |
| - Audioinstallationen<br>(Verstärker außerhalb der Zone): | 0,4 – 0,5 |
| - Motorantriebe (Motor außerhalb Zone):                   | 0,6       |
| - Pumpen und Steuerungen:                                 | 0,4 – 0,8 |

Die anzusetzenden Wärmelasten wurden dadurch deutlich gesenkt, teilweise um mehr als 50%. Im Ergebnis führte dies nach heutigem Stand zu einem realistischeren Ansatz (siehe Tabelle 4).

	Stand: September 2003				Stand: Oktober 2004			
	Raumklima	Fläche	max. Pers.	Wärmelast	Raumklima	Fläche	max. Pers.	Wärmelast
		[m <sup>2</sup> ]	[-]	[W/m <sup>2</sup> ]		[m <sup>2</sup> ]	[-]	[W/m <sup>2</sup> ]
Reise Z01	- 4 °C	631	111	65	<b>- 2 °C (+8°C)</b>	<b>362</b>	<b>60</b>	<b>23</b>
Reise Z02	9 °C	154	32	65	9 °C	<b>300</b>	<b>70</b>	<b>50</b>
Reise Z03	16 °C	760	182	65	<b>26 °C</b>	618	145	<b>52</b>
Reise Z04	26 °C	2339	644	65	26 °C	2008	615	<b>56</b>
Reise Z05	> 30°C	110	95	65	> 30°C	-	-	
Reise Z51	> 30°C, 80%	1288	142	65	> 30°C, 80%	1152	<b>270</b>	<b>57</b>
Reise Z06	> 35°C	506	95	65	> 35°C	440	97	<b>40</b>
<b>Summe Reise</b>		<b>5788</b>	<b>1301</b>			<b>4880</b>	<b>1257</b>	
ELEMENTE	20 - 26 °C	5250	1594	65	20 - 26 °C +x	<b>1692</b>	<b>459</b>	<b>48</b>
PERSPEKTIVEN	20 - 26 °C				20 - 26 °C +x	<b>1427</b>	<b>275</b>	<b>40</b>
sonst. AUSSTELLUNG	20 - 26 °C				22 - 26 °C	<b>790</b>	<b>438</b>	<b>63</b>
ZENTRAL-BEREICH	20 - 28 °C	1752	336	45	20 - 28 °C +x	1342	445	<b>43</b>
VERWALTUNG	20 - 28 °C	750	65	25	20 - 28 °C	726	83	<b>40</b>
RESTAURANT, SHOP, THEATER	20 - 26 °C	645	178	45	20 - 26 °C	851	352	<b>65</b>
TECHNIK		1380				2376	72	<b>17</b>
sonst. (Flure, Treppen,...)						4116	40	
<b>Summe</b>		<b>15565</b>	<b>3474</b>			<b>18200</b>	<b>3421</b>	

*Tabelle 4: Überblick über die Randbedingungen hinsichtlich Flächen, Personen und Wärmelasten nach Gebäudezonen im Vergleich Stand Sept. 2003 und Okt. 2004, die rot gedruckten Werte weisen Veränderungen aus. (x = statistische Auswertung aus Jahres-Simulation zeigt Maximaltemperaturen, siehe Abschnitt 3.2.3.1)*

Die kontinuierliche Verfolgung der internen Wärmelasten als für ein Ausstellungsgebäude wichtiger Schlüsselparameter über die gesamte Planungszeit hinweg erwies sich als wertvoller Bewusstseinsprozess bei allen betroffenen Planungspartnern, der sehr zur Optimierung der planerischen Ansätze und – durch die spätere Auswahl entsprechend optimierter Komponenten in der Ausstellungsinszenierung und beim Kunstlicht – letztlich zur unmittelbaren Einsparung erheblicher Mengen elektrischer Energie im realen Gebäude führen wird. Dabei werden gleichzeitig in erheblichem Umfang Betriebskosten gespart. Integrale Planung als enge Zusammenarbeit und Abstimmung mit allen Planungsbereichen ermöglicht vielfache Optimierungen innerhalb des Projektes als Ganzes.

Raumnummer	Raumbezeichnung	Ebene	Klimazone	Temperatur	Luft- feuchte	Beschreibung Klimazone KR	Fläche [m²]	Höhe [m]	Volumen [m³]	max. Personen	absolut			spezifisch spez interne Last (Wärmebelast) [W/m²]
											Anschluss [kW]	Verbrauch [kW]	Wärmebelast [kW]	
<b>Summe</b>							<b>1692</b>		<b>6658</b>	<b>459</b>	<b>138</b>	<b>118</b>	<b>100</b>	<b>48</b>
E 01 STA	Wettertum	+5,00 bis	E											
E 02 DCC		+5,00	E											
E 30 GLO			E											
E 40 GLO			E											
E 90 GLO			E											
E 90 GLO			E											
E 12 SCH			E											
E 11 4EL	Die vier Elemente	+10,70 bis	E				56,4	3,60	202,9	35	1,60	1,60	1,08	19,2
E 20 FEU	Elemente	+5,00	E				156,7	3,60	564,0	74	4,95	4,59	3,98	25,5
E 22 ENE	Energie	+5,00	E				60,0	3,00	216,0	12	2,90	2,90	1,99	33,2
E 23 AUF	Der Aufprall	+5,00	E				27,6	3,60	99,5	8	2,20	2,20	1,98	21,6
E 24 FLA	Flammenzerte	+5,00	E				31,0	3,90	120,9	8	1,90	1,90	1,58	51,0
E 30 ERD	Elemente	+9,20	E				129,3	3,62	468,1	42	3,45	3,45	2,53	19,6
E 32 INN	Ins Innere der Erde	+9,20	E				39,6	3,62	143,4	10	3,55	3,55	3,57	50,2
E 33 VUL	Vulkanhöhle	+9,20	E				69,7	3,62	251,0	12	1,50	1,50	1,50	25,1
E 34 ASC	Asche	+9,20	E				30,9	3,62	111,9	6	3,05	3,05	2,59	63,8
E 40 WAS	Elemente	+14,20	E				236,4	3,30	780,0	52	10,05	10,05	7,81	33,0
E 42 MEE	Meere	+14,20	E				26,5	3,30	94,0	8	0,95	0,95	0,77	27,0
E 43 OZE	Ozeanraue	+14,20	E				39,6	3,30	130,5	12	2,00	2,00	1,88	47,5
E 44 DAM	Dampf	+14,20	E				41,4	3,30	136,6	8	3,95	3,95	3,57	66,2
E 46 REG	Regen	+14,20	E				48,0	3,30	158,4	6	2,60	2,60	2,60	54,2
E 46 EIS	Eis	+14,20	E				45,0	3,30	148,5	8	4,70	4,70	4,22	83,8
E 50 LUF	Elemente	+16,80	E				195,7	3,10	606,6	42	3,90	3,90	3,90	19,9
E 51 LWA	Luft und Atmosphäre	+16,80	E				24,5	3,10	231,0	12	8,20	8,20	7,25	104,2
E 52 WIN	Winds	+16,80	E				95,9	3,10	173,4	10	5,70	5,70	3,99	60,4
E 53 COR	Corolis	+16,80	E				46,3	3,10	143,4	10	5,30	5,30	4,93	20,1
E 54 GEW	Gewitter	+16,80	E				44,0	3,10	136,4	12	6,00	6,00	6,00	136,4
E 60 LEB	Elemente	+20,20	E				155,8	3,50	545,2	32	3,80	3,80	3,08	19,8
E 61 FAC	Facetten des Lebens	+20,20	E				22,7	3,50	97,1	10	1,00	1,00	0,92	33,2
E 63 SIN	Der Sinnenraum	+20,20	E				102,0	3,50	357,0	15	4,60	4,60	2,98	26,2
E 70 KOM	Komplexität	+20,20	E				50,8	3,50	177,8	15	0,95	0,95	0,67	11,2

Tabelle 5: Übersicht Randbedingungen, Beispiel Tabellen-  
ausschnitt für Zone „Elemente“, Stand 4.10.2004

### 3.2.2.3 Raumbuch

Bedingt durch die Vielzahl der unterschiedlichen Räume mit teilweise extrem unterschiedlichen Nutzungsparametern erwies sich die Fortschreibung eines Raumbuches innerhalb des Planungsprozesses als unabdingbar. Auch wenn die Nutzung eines einheitlichen Raumbuches für alle relevanten Nutzungsparameter durch alle Planungsbeteiligten über die lange Projektlaufzeit nicht immer durchgängig gelang, so leistete diese Einrichtung doch wichtige Dienste, insbesondere bei der Festschreibung der internen Wärmelasten in den Ausstellungsräumen, der Flächenverfolgung und bei den Nutzungsprofilen. Tabelle 4 zeigt ein Beispiel für die Zone „Elemente“.

## 3.2.3 Konzeptplanung am Beispiel des Bereiches „Elemente“

Bei den konzeptionellen Untersuchungen galt das Hauptaugenmerk den Bereichen außerhalb der „Reise“, da hier realistische Möglichkeiten zur Integration natürlicher Klimatisierungskonzepte bestehen. In der „Reise“ scheiden derartige Möglichkeiten aufgrund der z. T. extremen Klimabedingungen weitgehend aus (vergleiche Abbildung 2).

Einen Schwerpunkt innerhalb der Gesamtplanung bildete somit die Entwicklung eines natürlichen Klimakonzepts für die Gebäudebereiche mit „üblichen“ Klimabedingungen, insbesondere für die Ausstellungsteile „Elemente“, „Perspektiven“ und den Zentralbereich, die zusammen gut ein Drittel der Besucherfläche bilden. Ziel war es hier ein Konzept zu entwickeln und umzusetzen, das vollständig ohne den Einsatz mechanischer Klimakälte auskommt. Die planerischen Entwicklungsschritte sollen hier beispielhaft anhand des Bereiches „Elemente“ umrissen werden.

### 3.2.3.1 Konzeptentwicklung (Integration Gebäudemasse, natürliche Lüftung)

Die Konzeptentwicklung erfolgte anhand von Modelluntersuchungen mittels dynamischer thermischer Gebäudesimulation<sup>1</sup> mit dem Ziel das Potential einer natürlichen oder natürlich unterstützten Lüftung zu ermitteln und die Auswirkungen einer leichten und einer massiven, thermisch schwer speichernden Bauweise zu bewerten.

Hierzu war zunächst die Aufteilung des Bereichs der „Elemente“ in zwei unterschiedliche thermische Zonen nötig (siehe Abbildung 10):

**Thermische Zone 1** (1365 m<sup>2</sup>, 4750 m<sup>3</sup>, Stand 4.10.2004) umfasst die Ebenen +5.00 bis +16.80, die durch massive Betondecken voneinander getrennt sind und somit eine Bauteilaktivierung (thermisch schwer speicherndes System) erlauben. Alternativ können hier die Decken abgehängt und Kühldecken installiert werden.

**Thermische Zone 2** (327 m<sup>2</sup>, 1300 m<sup>3</sup>, Stand 4.10.2004) umfasst die oberste Ebene +20.20, die keine massive Decke aufweist und somit die Option Bauteilaktivierung entfällt. Hier wurden für die statische Kühlung ausschließlich Kühldecken angesetzt.

---

<sup>1</sup> Für die Simulationsrechnungen wurde das Programmpaket TRNSYS verwendet.

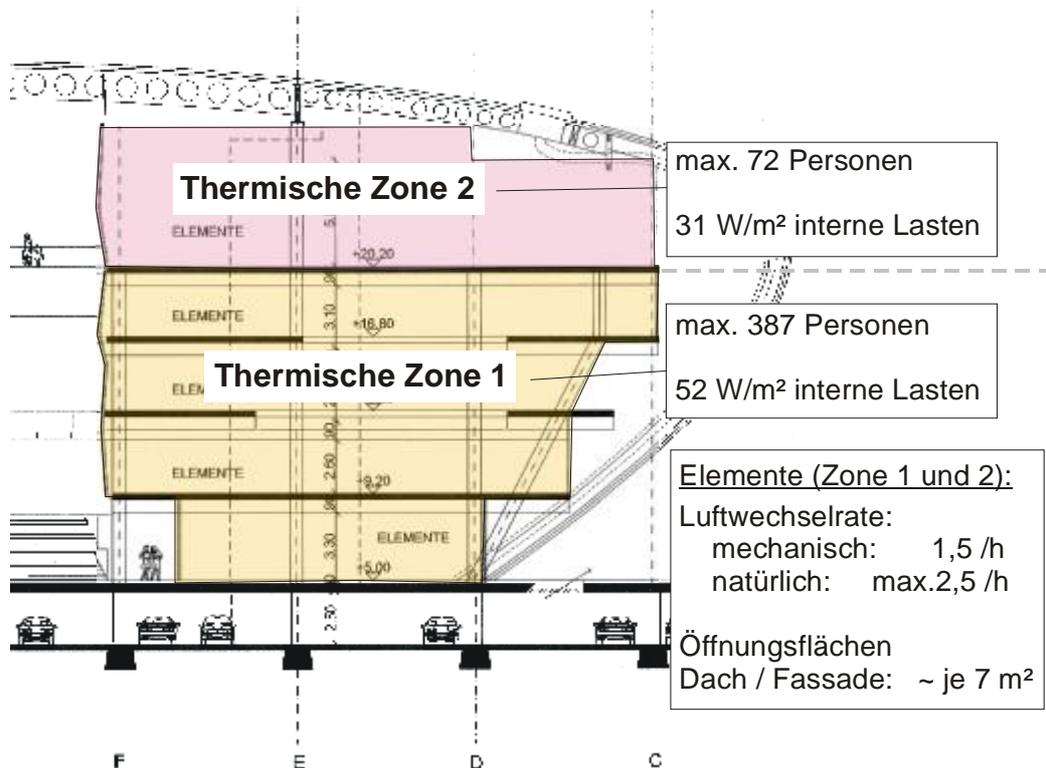


Abbildung 10: Zonierung des Bereiches „Elemente“ für die thermische Simulation mit wichtigen Randbedingungen

In der Simulation wird eine natürliche Durchlüftung mit Außenluft getrennt für die beiden Zonen 1 und 2 berechnet, die entsprechend der jeweils wirksamen Höhe der Luftsäule dynamisch von der Temperaturdifferenz zwischen der Lufttemperatur im Raum und der Außenlufttemperatur abhängt.

Um sicherzustellen, dass alle Teilbereiche der „Elemente“ von dem notwendigen Luftwechsel erreicht werden, erfolgt eine vertikale Aufteilung der „Elemente“ in einen zur Fassade hin orientierten Bereich, der direkt über die Außenfassade belüftet wird und einen inneren Bereich, wo (unkonditionierte) Außenluft mechanisch eingebracht wird. Die Abluffführung für beide Bereiche erfolgt frei über den inneren Luftraum (Wetterturm) mit Ablüftung über Dach. Auf diese Weise werden die am Wetterturm erzeugten thermischen Lasten direkt nach oben abgeführt (vgl. Abbildung 11).

Die Integration der massiven Gebäudeteile als thermische Speichermasse dient dazu, die Erzeugung der notwendigen Kälteenergie von den warmen Tag- in die kühlen Nachtstunden zu verschieben, in denen die benötigte „Kälteenergie“ unmittelbar aus der Umgebungsluft zur Verfügung steht. Voraussetzung für einen wirkungsvollen Einsatz dieser Technik sind z.B. frei zugängliche Geschossdecken (Vermeidung von abgehängten Deckenbereichen), so dass eine enge Abstimmung mit der Ausstellungsplanung erforderlich war. Ebenso wie die Ausnutzung offener Lufträume für die Luftführung im Gebäude oder die Integration von Außenluftöffnungen innerhalb der Ausstellungsinszenierung sind dies typische Beispiele für integrale Planungskonzepte, die die Mehrfachnutzung vorhandener Elemente ermöglicht und somit die energetische und wirtschaftliche Gesamteffizienz erhöht.

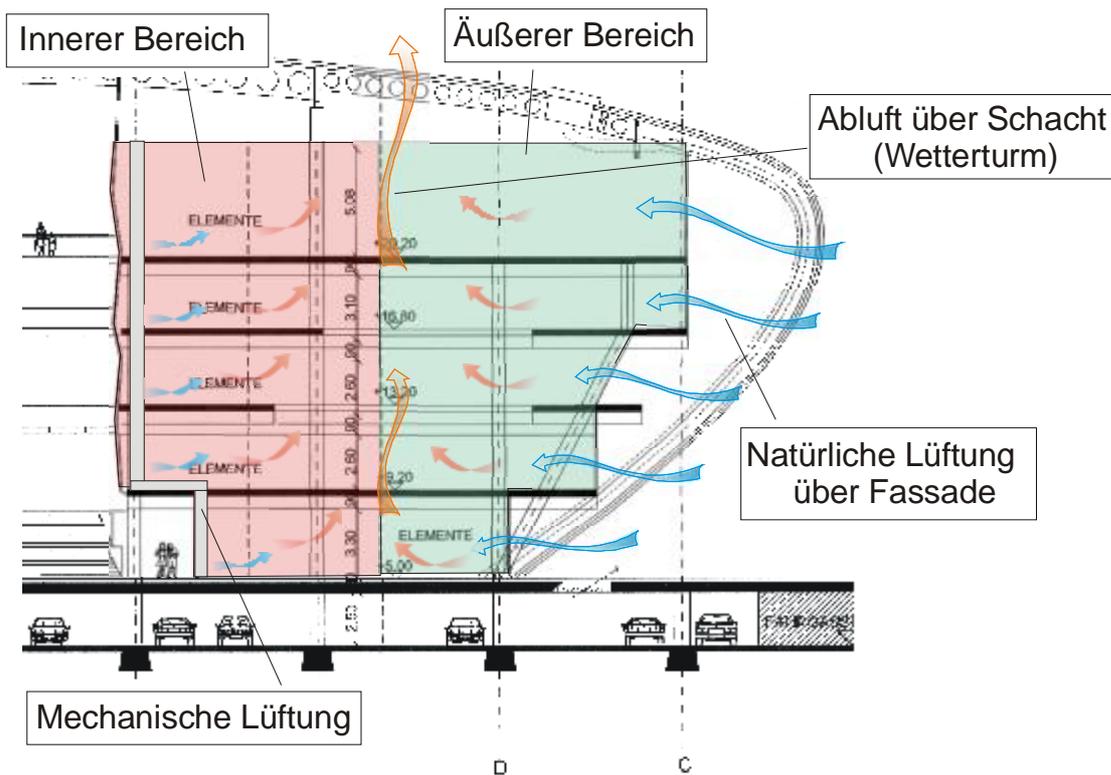


Abbildung 11: Innovatives Lüftungskonzept „Elemente“: Zonierung der Bereiche mit natürlicher und mechanischer Lüftung

### 3.2.3.2 Vergleich mit konventionellem Klimatisierungskonzept

Verglichen wurden verschiedene Konzeptvarianten mit konventionellen und natürlichen Konzeptelementen im Bereich der Kühlung und Lüftung:

1. Bauteilaktivierung (BTA), mechanische Lüftung während der Betriebszeit mit konstant 15 °C Zulufttemperatur und Umluftkühlung auf eine maximale Raumlufttemperatur von 26 °C
2. Bauteilaktivierung, mechanische Lüftung während der Betriebszeit mit konstant 15 °C Zulufttemperatur, ohne weitere Kühlung
3. Bauteilaktivierung, mechanische Lüftung während der Betriebszeit mit konstant 15 °C Zulufttemperatur, ohne weitere Kühlung, Nachtlüftungspülung mit kühler Nachluft außerhalb der Betriebszeit
4. Bauteilaktivierung, natürliche Lüftung während der Betriebszeit mit Außenluft, Nachtlüftungspülung mit kühler Nachluft außerhalb der Betriebszeit
5. Kühlung mittels Kühldecke, mechanische Lüftung während der Betriebszeit mit konstant 15 °C Zulufttemperatur, abgehängte Decken
6. Kühlung mittels Kühldecke, natürliche Lüftung während der Betriebszeit mit Außenluft, Nachtlüftungspülung mit kühler Nachluft außerhalb der Betriebszeit
7. Eine weitere Variante (nur dargestellt in Abbildung 17) zeigt das Ergebnis für den Fall, dass nur natürlich gelüftet wird und keinerlei aktive Kühlmaßnahmen installiert sind.

## Varianten Lüftungskonzept

Abbildung 12 stellt das konventionelle Referenzkonzept schematisch dar. Alle Bereiche sind mit einer mechanischen Zu- und Abluftanlage sowie Kühldecken ausgestattet. Zusätzliche Kühlung erfolgt bei Bedarf mit Hilfe von Umluft-Kühlgeräten.

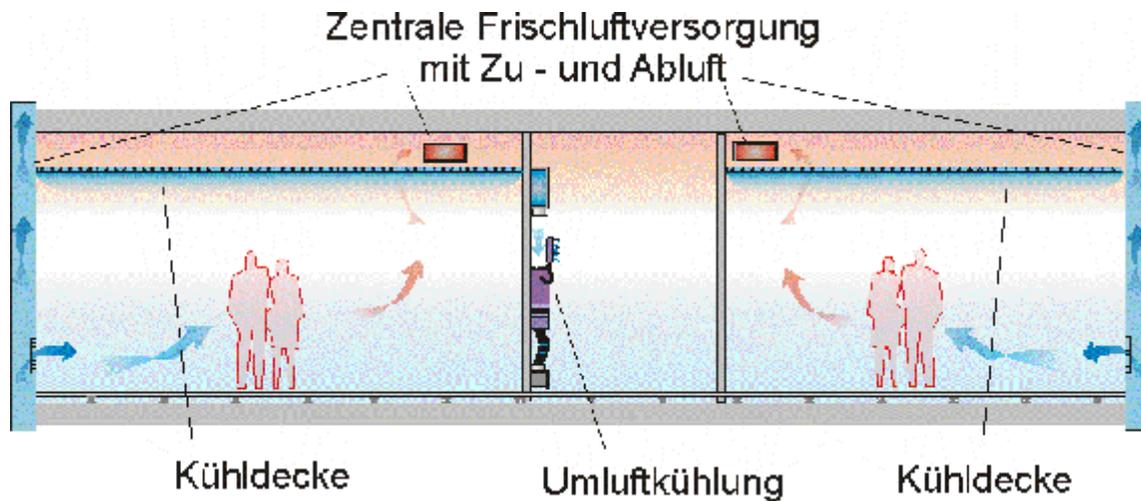


Abbildung 12: Grundkonzept Klima und Lüftung „Elemente“

Das Prinzip des neuen, natürlichen Lüftungskonzepts zeigt Abbildung 13. Der äußere Bereich wird im Betriebszustand „Natürliche Lüftung“ direkt über die Fassade mit Außenluft belüftet, der innere Bereich erhält dann Frischluft als unconditionierte Außenluft über ein kanalgeführtes Zuluftsystem. Die Abluft aus beiden Bereichen wird über den inneren Luftraum (Wetterturm) nach oben abgeführt.

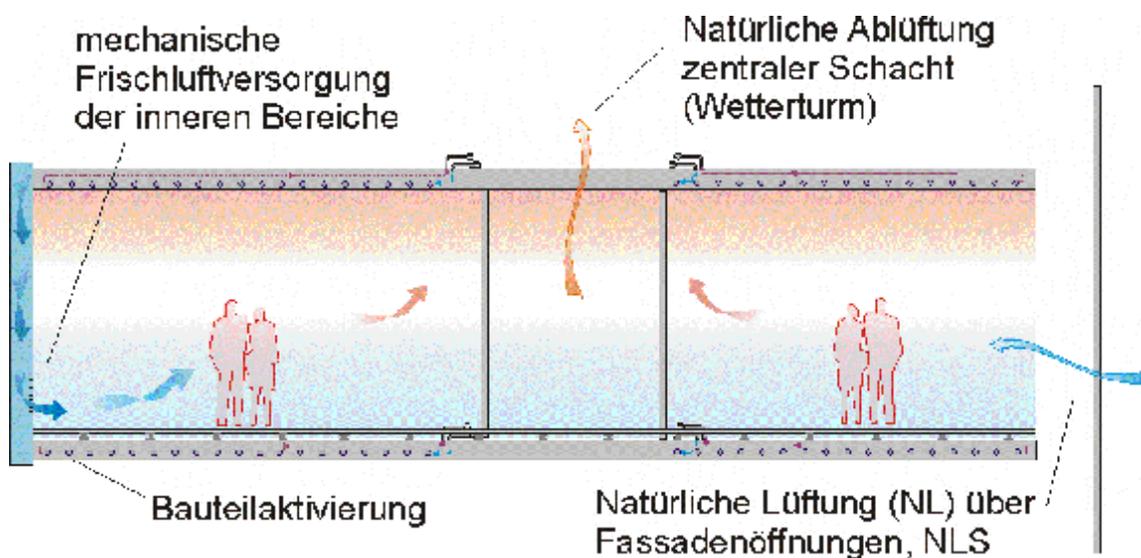


Abbildung 13: Natürliches Lüftungskonzept „Elemente“ mit mechanischer Zuluft im inneren Bereich und natürlicher Lüftung im äußeren Bereich

## Varianten Belegung der aktivierten Fläche

Die Konzeptvarianten wurden zusätzlich auch hinsichtlich der Ausführung mit offenen Betondecken (mit Bauteilaktivierung, BTA) bzw. bei abgehängten Decken mit Kühldeckenfunktion untersucht, wobei jeweils ein Anteil an aktiver Fläche von 50% und 80% untersucht wurde. Der nicht wasserseitig aktive Teil der Decken steht für eine Aktivierung mit kühler Nachtluft (Nachtluftspülung, NLS) zur Verfügung.

Die Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Belegungsgrad beispielhaft für die Variante mit BTA.

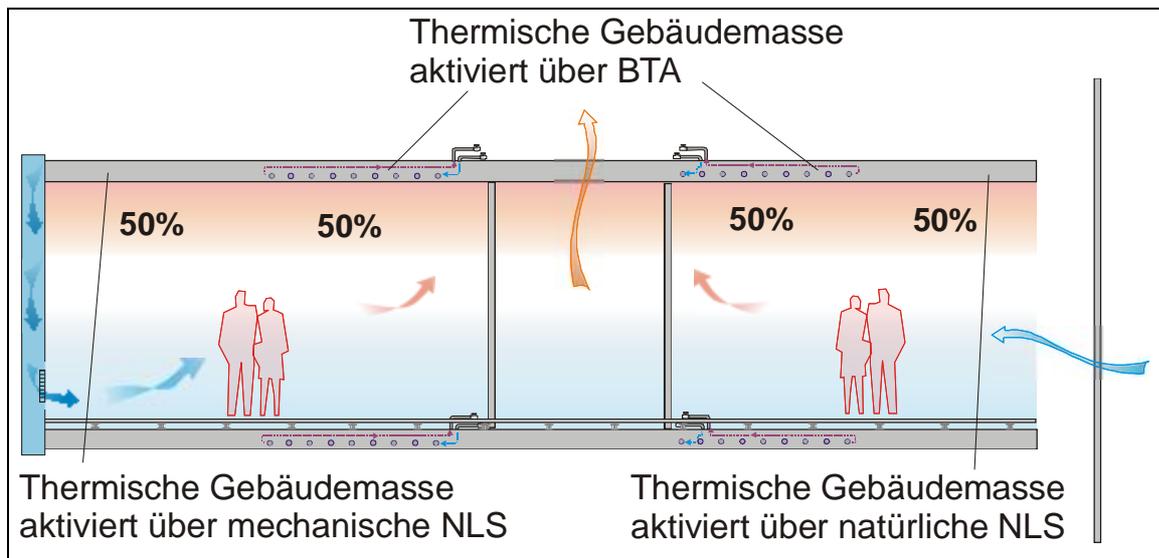


Abbildung 14: Variante der thermischen Simulation mit Belegungsgrad Bauteilaktivierung (BTA) 50%

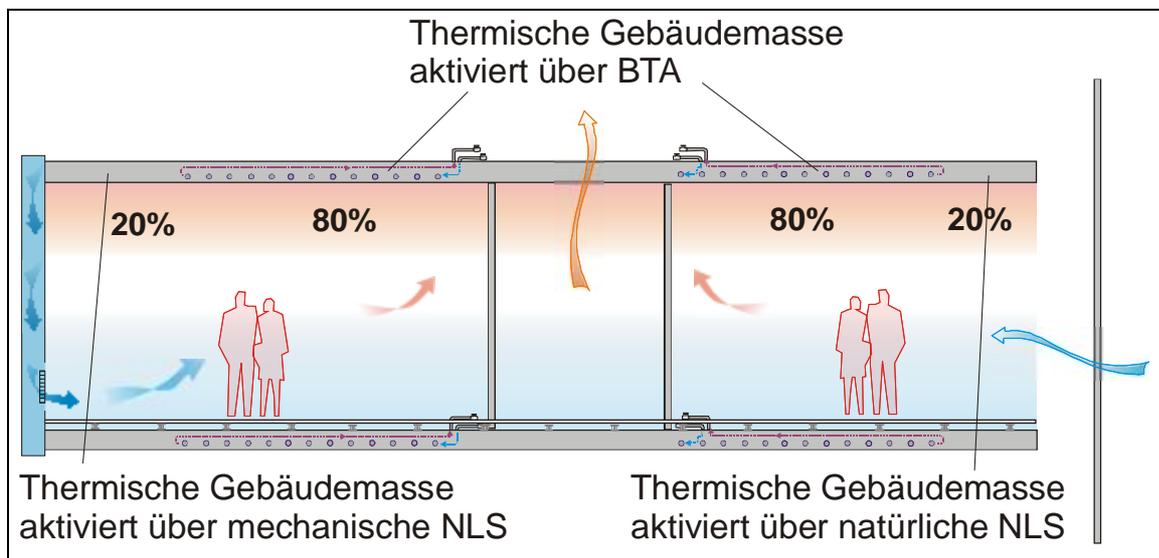


Abbildung 15: Variante der thermischen Simulation mit Belegungsgrad Bauteilaktivierung (BTA) 80%

### 3.2.3.3 Bewertung des Konzepts, thermische Simulation

Im nachfolgenden sind die prinzipiellen Ergebnisse der untersuchten Varianten am Beispiel der Thermischen Zone 1 und für eine 50% bzw. 80% Belegung dargestellt. Um das Verhalten des Gebäudes auch für extreme Wetterbedingungen zu erfassen wurden zusätzlich Berechnungen mit Messdaten des Deutschen Wetterdienstes aus dem Jahr 1992 wiederholt. Zudem wurde der Betrieb im Winter und zu Übergangszeiten untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Bericht [2] auf Seiten 19 bis 44.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden anhand von Jahres-Temperaturstatistiken (Beispiel siehe Abbildung 17) verglichen und anhand dynamischer Temperaturverläufe an kritischen Tagen im Detail ausgewertet (Beispiel siehe Abbildung 19). Die statistische Darstellung gibt an, an wie vielen Stunden im Jahr während der Nutzungszeit des Gebäudes statistisch gesehen bestimmte Rauminnentemperaturen überschritten werden und erlaubt so die Bewertung und den direkten Vergleich einzelner Konzepte. Ausgewertet wurde jeweils die sog. operative (oder empfundene) Raumtemperatur, die neben der Lufttemperatur auch den Einfluss der Temperatur der Raumumschließungsflächen berücksichtigt.

#### **Temperaturstatistik mit Wetterdaten Testreferenzjahr (TRY) Bremerhaven**

Für den Fall einer 50%igen Belegung der Decke mit Bauteilaktivierung bzw. im Falle von abgehängten Decken mit Kühldecke in Zone 1 sind die Ergebnisse in Abbildung 16 bei Wetterdaten gemäß dem TRY Bremerhaven dargestellt. Der schwarze Pfeil markiert jeweils die 26 °C-Grenze für den Fall Bauteilaktivierung mit natürlicher Lüftung und Nachtlüftungspülung (natürliches Konzept). Diese Grenze wird üblicherweise als Komfortgrenze bezüglich der Raumtemperatur herangezogen. Man erkennt, dass

- im Fall mit Bauteilaktivierung, mechanischer Lüftung und zusätzlicher Umluftkühlung (braun) das Temperaturniveau insgesamt sehr hoch ist, durch die Regelung der Umluftkühlung die 26 °C – Grenze im Raum jedoch nie überschritten werden.
- im Fall mit Bauteilaktivierung und mechanischer Lüftung ohne zusätzliche Umluftkühlung (orange) die Anzahl der Stunden oberhalb von 26 °C noch über die Hälfte der Betriebszeit ausmacht (2046 h/a) und an deutlich über 10% der Zeit (506 h/a) sogar 28 °C überschritten werden. Das Temperaturniveau ist insgesamt unkomfortabel hoch.
- alle Varianten ohne Nachtlüftungspülung (braun, orange) zu deutlich höheren Raumtemperaturen führen als die Varianten mit Nachtlüftungspülung (grün, gelb, magenta).
- durch die natürliche Lüftung das Kühlpotential der Außenluft besser ausgenutzt wird als mit mechanischer Lüftung (gelber Balken im unteren Temperaturbereich kleiner als grüner Balken).
- die mechanische Lüftung jedoch bei besonders warmen Außenbedingungen einer Überhitzung des Raumes besser entgegenwirken kann als die natürliche Lüftung (gelber Balken im oberen Temperaturbereich größer als grüner Balken).
- ohne eine Bauteilaktivierung (nur natürliche Lüftung und Nachtlüftungspülung, dunkelblauer Balken) die 26 °C-Grenze an über 35 % der Betriebszeit (1300 h/a) überschritten wird und noch an 157 h/a mehr als 28 °C erreicht werden.
- mit dem vorgeschlagenen natürlichen Lüftungssystem (Bauteilaktivierung, natürliche Lüftung und Nachtlüftungspülung) die 26 °C-Grenze an 171 h/a (ca. 4 % der Betriebszeit) und die 28 °C-Grenze an 26 h/a (ca. 6 ‰ der Betriebszeit) überschritten wird.

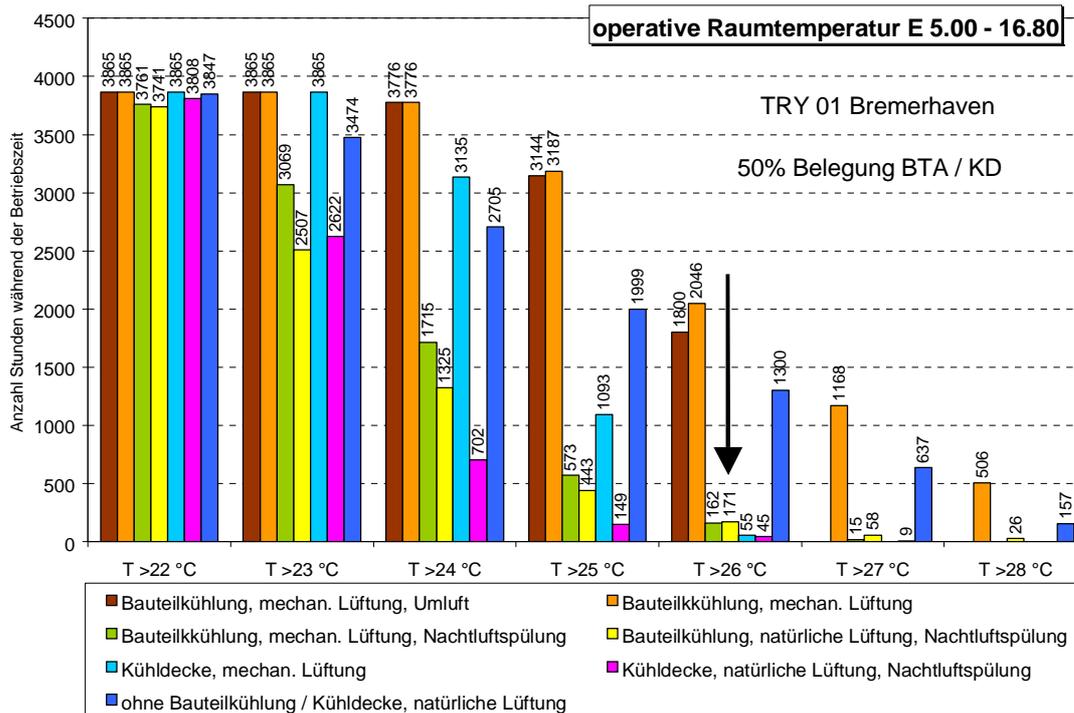


Abbildung 16: Jahres-Temperaturstatistik Zone 1 (Ebenen +5.00 – +16.80) im Bereich „Elemente“ für 50% Belegung Bauteilaktivierung (BTA) bzw. Kühldecke (KD) als Ergebnis der dynamischen thermischen Gebäudesimulation, Stand 4.10.2004

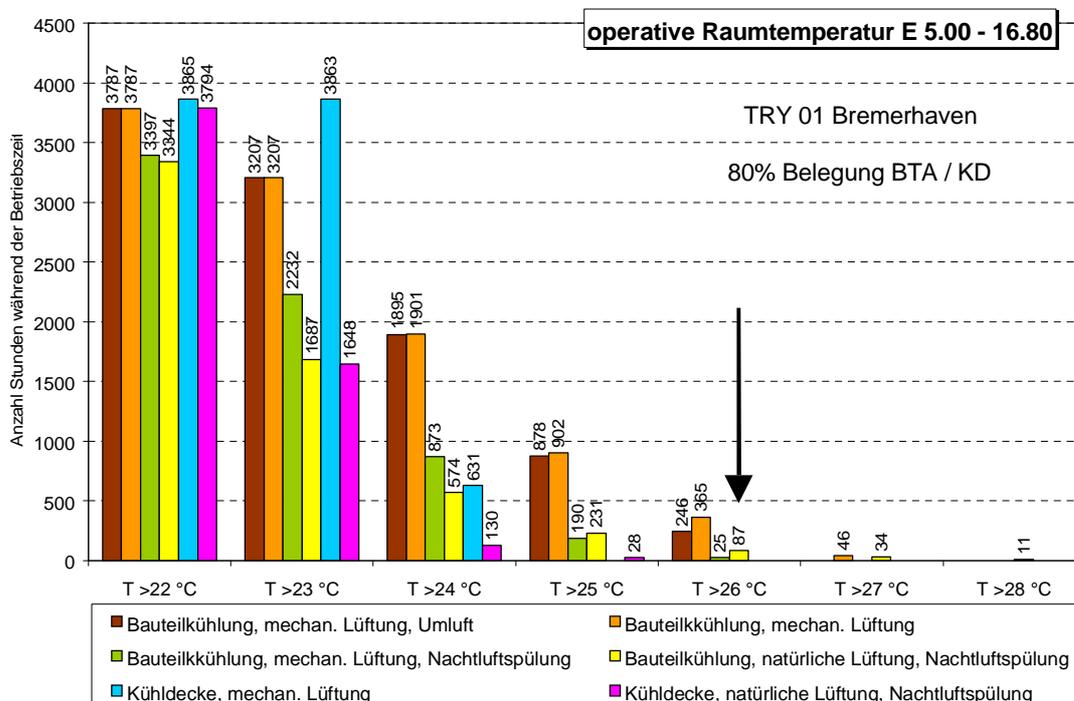


Abbildung 17: Jahres-Temperaturstatistik Zone 1 (Ebenen +5.00 – +16.80) im Bereich „Elemente“ für 80% Belegung Bauteilaktivierung (BTA) bzw. Kühldecke (KD) als Ergebnis der dynamischen thermischen Gebäudesimulation, Stand 4.10.2004

- mit Kühldecken und abgehängten Deckenbereichen ein mit den Fällen Bauteilaktivierung und offene Betondecken vergleichbarer Komfort erzielt werden kann (hellblauer und magentafarbener Balken).

Die Abbildung 17 gibt die Ergebnisse für den Fall einer erhöhten Belegung (80 %) der Decken mit Bauteilaktivierung bzw. Kühldecken wieder (Wetterdaten gemäß TRY Bremerhaven). Es zeigt sich, dass das Temperaturniveau im Raum insgesamt deutlich abnimmt und für das vorgeschlagene System (gelber Balken) nur noch 87 h/a (2 % der Betriebszeit) über 26 °C zu erwarten sind, also nur noch halb so viele Stunden wie im Falle einer 50 %igen Belegung. 28 °C werden nicht mehr überschritten.

Eine Auswertung der Jahreskühlenergien für den Fall mit 80% Belegung ist in Abbildung 18 dargestellt. Bei der Kühlung über Bauteilaktivierung (4. Summenbalken) ist der Kältebedarf zunächst etwas höher als bei Kühlung über Kühldecke (6. Summenbalken). Dies ist v. a. in der massebehafteten Trägheit des Systems begründet.

Der wesentliche Systemunterschied wird durch die zusätzlichen Angaben deutlich: Der Kältebedarf der Bauteilkühlung kann vollständig über einen Kühlturm und damit zu 100 % regenerativ gedeckt werden, während fast die Hälfte (45 %) der für die Kühldecke nötigen Kälte aufgrund der tieferen Vorlauftemperatur im System mechanisch und so mit hohem Primärenergieaufwand erzeugt werden muss.

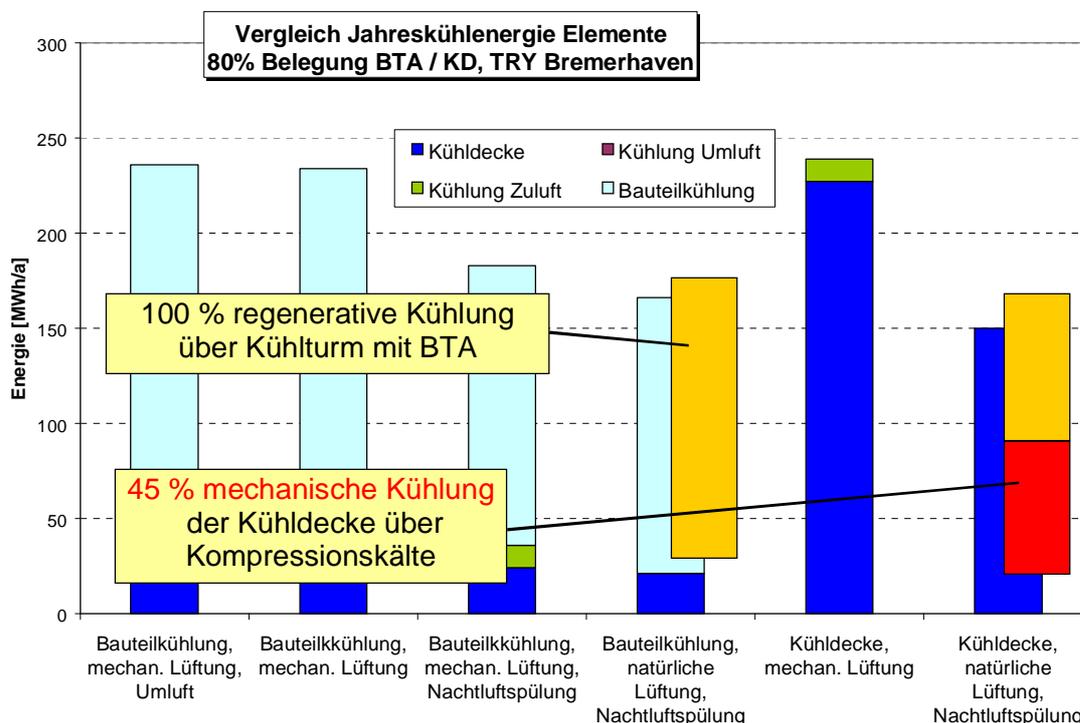


Abbildung 18: Vergleich des regenerativen Kühlpotentials für den Fall 80% aktive Belegung zwischen Bauteilaktivierung (BTA) und Kühldecke (KD) als Summe für den Gesamtbereich „Elemente“

## Tagesgang der Rauminnentemperaturen mit Wetterdaten Testreferenzjahr (TRY) Bremerhaven

Eine Auswertung des Tagesganges der operativen Raumtemperaturen an einem heißen Sommertag gibt Aufschluss über die Temperaturentwicklung im Raum über den Tag und hilft bei der Interpretation der statistischen Werte aus den vorangegangenen Darstellungen. Abbildung 19 zeigt einen solchen Tagesgang für zwei aufeinander folgende Sommertage aus dem TRY Bremerhaven.

Im Falle einer rein natürlichen Lüftung (gelbe Linie) treten bei diesen Wetterbedingungen und maximalen internen Wärmelasten (hohe Besucherdichte) – vorwiegend am Nachmittag – empfundene Rauminnentemperaturen oberhalb von 26 °C auf. Gegen Abend werden Spitzentemperaturen bis etwa 29 °C erreicht.

Wird die natürliche Lüftung tagsüber durch eine mechanische Lüftung (Zulufttemperatur 15 °C) ersetzt (grüne Kurve), so kann die operative Raumtemperatur während des ganzen Tages unterhalb von 26 °C gehalten werden.

Um auch in derartigen Situationen ein komfortables Raumklima zu gewährleisten, wurde die Möglichkeit einer Spitzenkühlung der Zuluft vorzuhalten empfohlen.

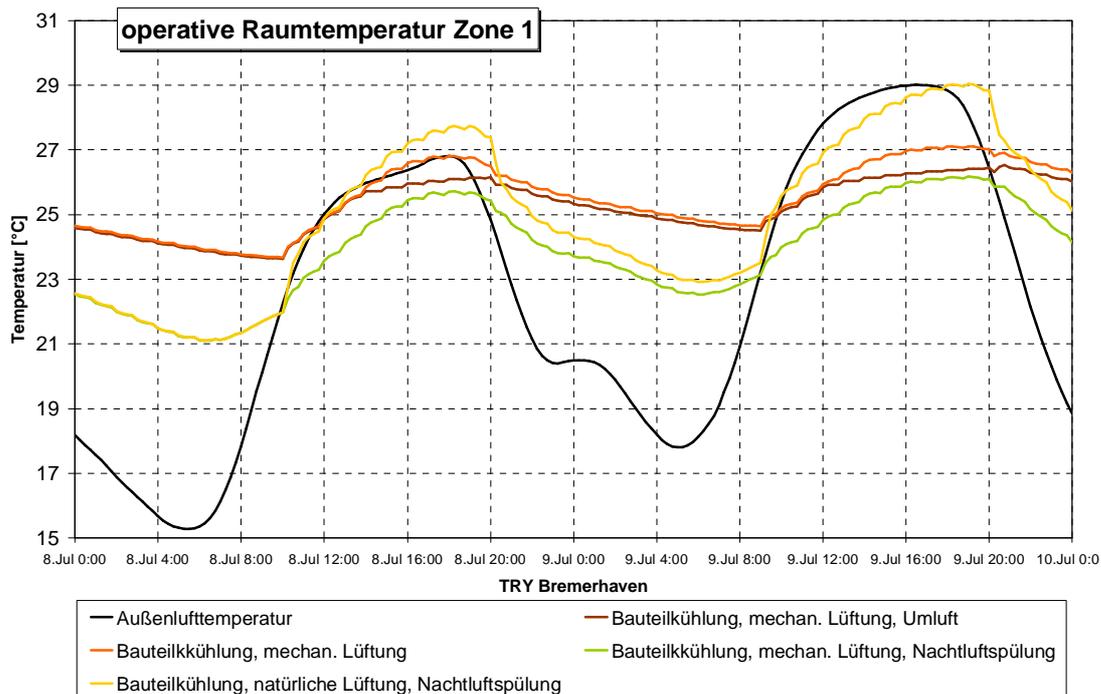


Abbildung 19: Temperaturverlauf in Zone 1 des Bereiches „Elemente“ während einer sommerlichen Periode (Bauteilaktivierung 80% Belegung)

### 3.2.3.4 Zusammenfassung des Konzepts für „Elemente“ (Stand Nov. 2004)

Die Abbildung 20 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für das TRY Bremerhaven während der Betriebszeit des Klimahauses. Die möglichen Betriebszustände des natürlichen Lüftungskonzepts sind farblich hinterlegt. In den Betriebszuständen „Umluftbeimischung“ und „Außenluft direkt“ (Übergangszeit) werden die gewünschten Zuluftzustände in der Anlage ohne Energiezufuhr von außen bereitgestellt. Das sind im TRY Bremerhaven insgesamt 3693 Stunden oder 96 % der Betriebszeit.

Das Lüftungskonzept setzt auf eine maximale Ausnutzung des natürlichen Außenluftpotentials zur Wärmeabfuhr aus dem Gebäude. Gerade an einem Standort wie Bremerhaven mit gemäßigttem Klima besteht ein großes Potential für diese direkte Nutzung der Außenluft.

Im Winter wird durch eine geeignet ausgelegte Umluftbeimischung eine wirkungsvolle Wärmerückgewinnung erzielt. Durch den direkten Anschluss der „Elemente“ an Fassadenöffnungen kann im Bereich „Außenluft direkt“ die fassadenseitige Hälfte der Ausstellungsfläche ohne Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage natürlich gelüftet werden.

Der Kältebedarf ist auf eine reine Spitzenkühlung reduziert. Im TRY Bremerhaven tritt dieser Fall an etwa 3 % der Betriebszeit auf. Wärmebedarf für eine Nachheizung der Zuluft wird bei der gewählten Auslegung mit Umluftbeimischung nur noch in verschwindend geringem Umfang benötigt.

Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse findet sich in [2] auf Seiten 19 bis 44.

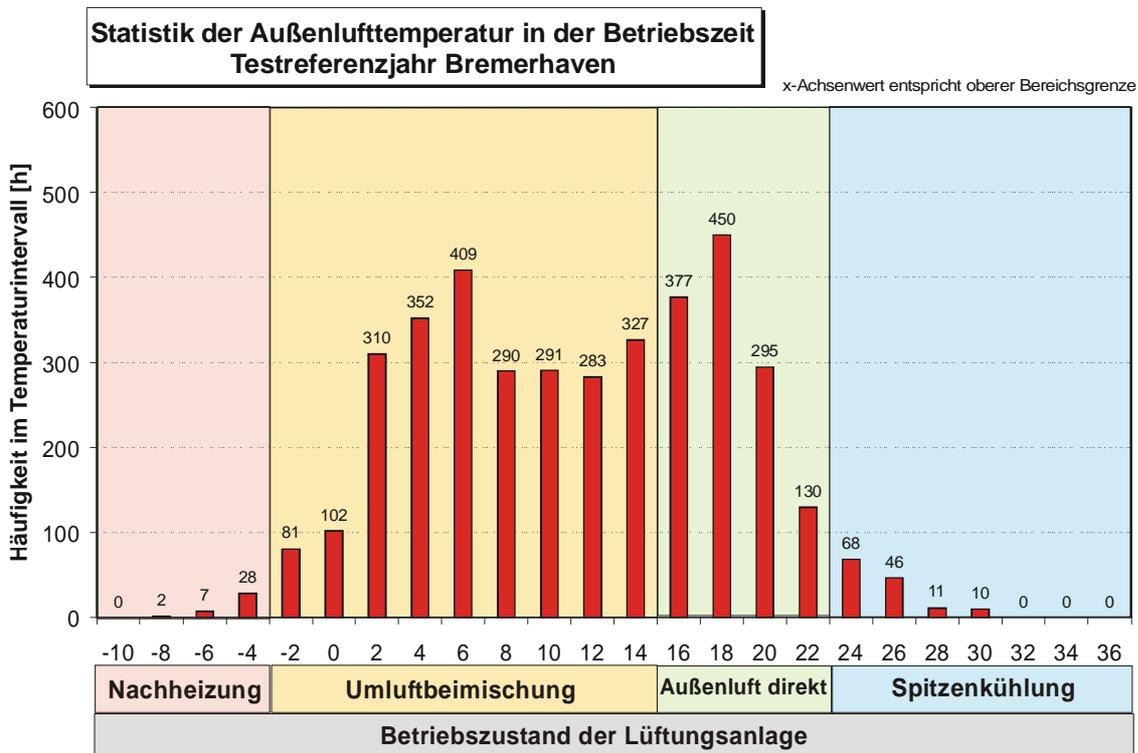


Abbildung 20: Statistische Verteilung der Außentemperatur im TRY Bremerhaven mit Kennzeichnung der Betriebszustände des natürlichen Lüftungskonzepts für den Bereich „Elemente“

Zusammenfassend erwies sich das Konzept mit 80%iger Bauteilaktivierung, natürlicher Lüftung und Nachtlüftungspülung als leistungsfähige Variante und wurde für die Umsetzung empfohlen. In Abbildung 21 sind beispielhaft Kühlenergien und das jeweilige regenerative Kühlpotential der 3 Hauptvarianten gegenübergestellt. (Der verbleibende Kühlenergiebedarf zur Spitzenkühlung der mechanischen Zuluft konnte im Verlauf der weiteren Projektbearbeitung vollständig durch die thermische Nutzung von Energiepfählen ersetzt werden (siehe Abschnitt 3.3.2.3).)

Die zuvor beschriebene Art der Bewertung erwies sich als eine wichtige Grundlage für einen engen Dialog mit dem Betreiber, dem anhand der Ergebnisse aufgezeigt werden konnte, welche Zustände sich hinsichtlich der operativen Raumtemperatur einstellen, wenn vorrangig natürlich unterstützte Systeme mit ihren spezifischen Eigenschaften zum Einsatz kommen und inwieweit sich das System und dessen Leistungsfähigkeit von konventionellen, mechanischen Systemen unterscheidet.

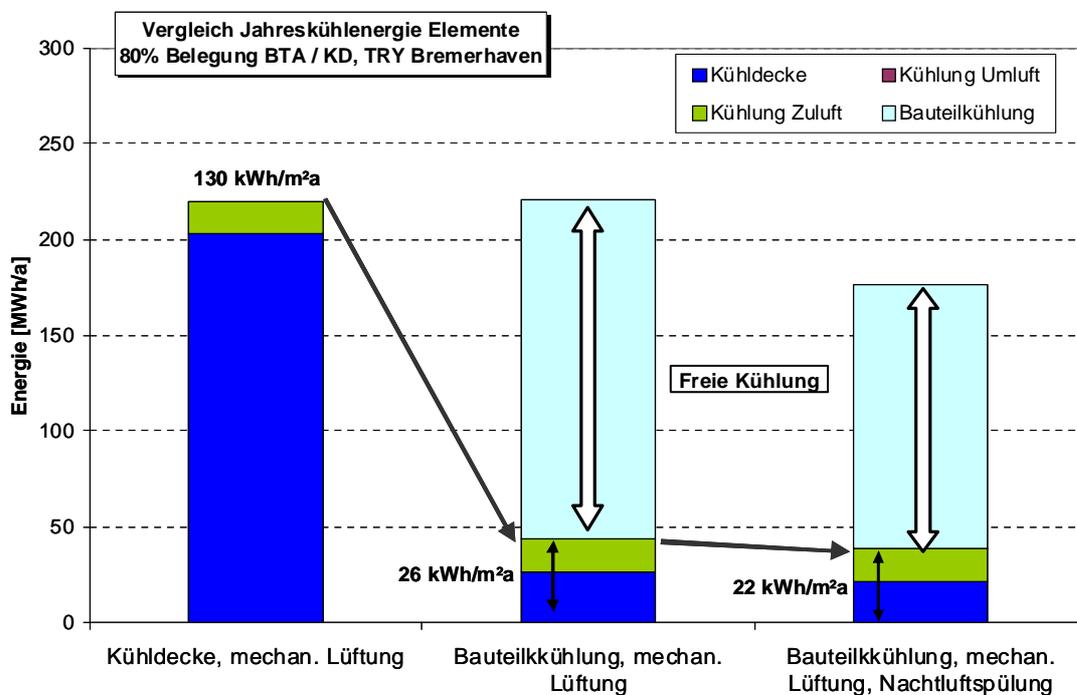


Abbildung 21: Vergleich des regenerativen Kühlpotentials für den Fall 80% aktive Belegung zwischen Bauteilaktivierung (BTA) und Kühldecke (KD) als Summe für den Gesamtbereich „Elemente“ (Stand Okt. 2004)

### 3.2.3.5 Übertragung auf andere Gebäudebereiche

Die angewandten Methoden und Konzepte wurden auf andere, ähnlich strukturierte Gebäudeteile übertragen und einzeln bewertet. Dies betraf im Wesentlichen die Bereiche „Perspektiven“ und den Zentralbereich („Foyer“, „Zentrale Erschließung“, „Schlucht“).

### 3.2.4 Ermittlung des Gebäude-Energiebedarfs

Die Zusammenführung der verschiedenen Konzepte und Randbedingungen diente als Grundlage für eine gegenüber den vorangegangenen Planungsschritten aktualisierten Ermittlung des Energiebedarfs des Klimahauses durch dynamische thermische Simulation aller Gebäudezonen mit TRNSYS auf Basis der Wetterdaten des Testreferenzjahres Bremerhaven zum Stand vom Oktober 2004.

Der Heizenergiebedarf zeigt sich ein typischer Sommer- / Winter-Verlauf mit außen-temperaturabhängigen Leistungsspitzen. Ein gewisser Wärmebedarf verbleibt im Sommer für die warmen Zonen innerhalb der Reise. Insgesamt ergab sich ein Jahres-Heizwärmebedarf von ca. 220 MWh/a.

Beim Kältebedarf zeigte sich, dass eine ganzjährige Grundlast an Kältebedarf im Bereich von 80 kW besteht. Insgesamt ergab sich ein Jahres-Kältebedarf von 1043 MWh/a. Die Jahresprofile für Wärme- und Kältebedarf zum Stand vom Oktober 2004 sind in Abbildung 22 dargestellt.

Die Darstellung der geordneten Jahresdauerlinien des Wärme- und Kältebedarfs in Abbildung 23 zeigt noch einmal die Dominanz des Kältebedarfs mit einer ausgeprägten Grundlast über das gesamte Jahr mit einer Maximalleistung von rund 600 kW.

Im weiteren Planungsverlauf zeigt sich, dass in dieser Bilanz noch nicht alle Verbraucher und Energiebedarfe vollständig erfasst waren, weil u. a. noch keine Planungsangaben vorlagen die berücksichtigt werden konnten

Als Beispiel sind etwa die Aquarien zu nennen, deren Planung zu damaligen Zeitpunkt noch nicht genau genug bekannt war, die aber einen erheblichen Energiebedarf aufweist.

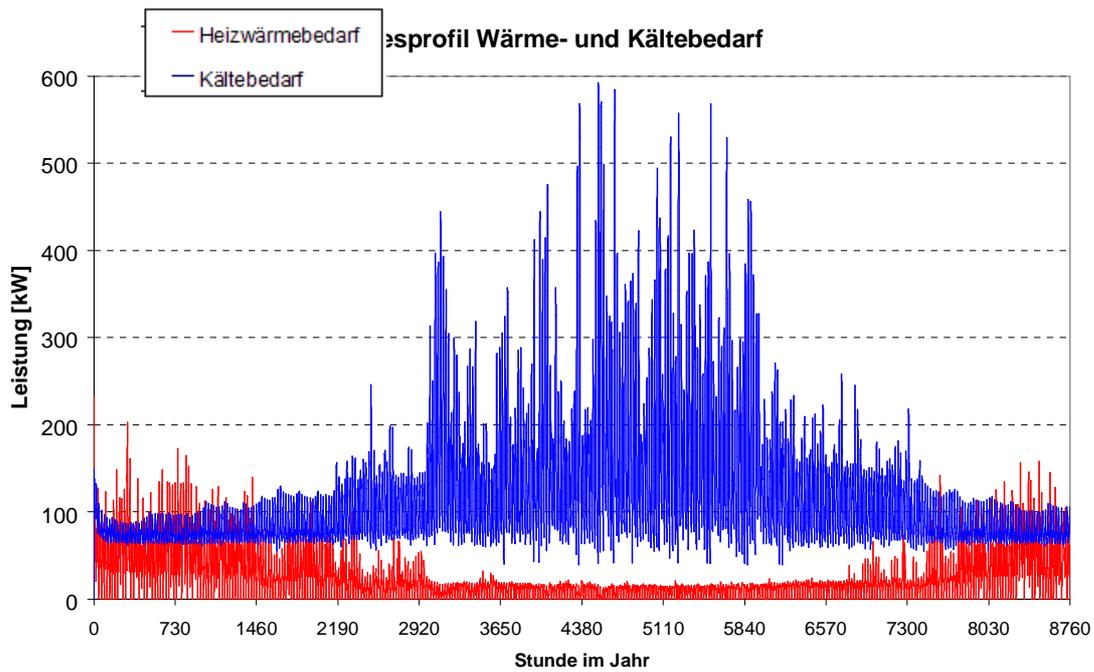


Abbildung 22: Jahresprofile für Wärme- und Kältebedarf (Stand 4.10. 2004)

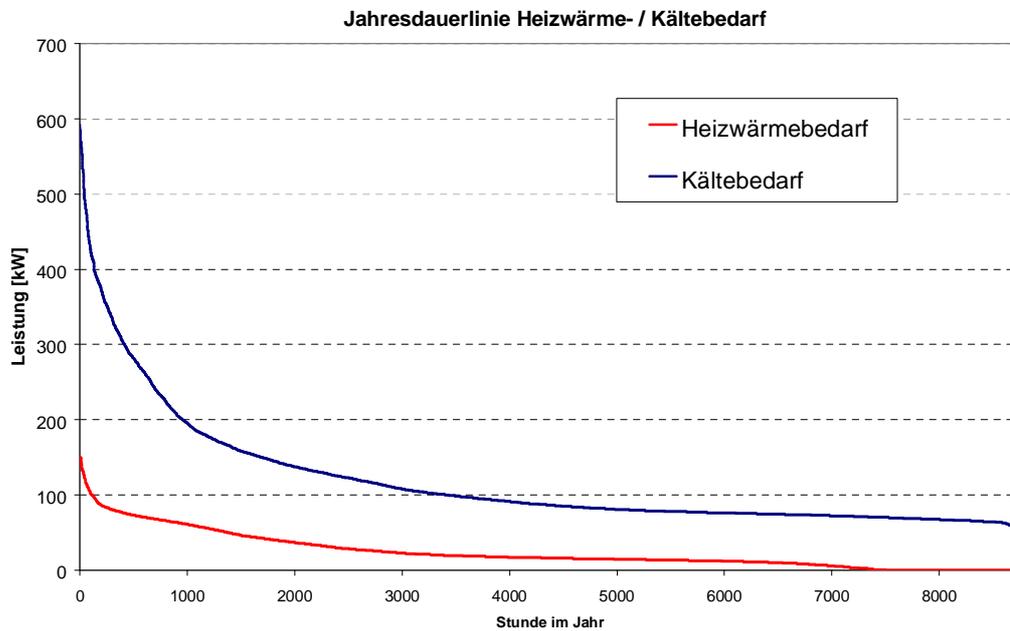


Abbildung 23: Geordnete Jahresdauerlinie Heizwärme- und Kältebedarf Klimahaus (Stand: 4.10. 2004)

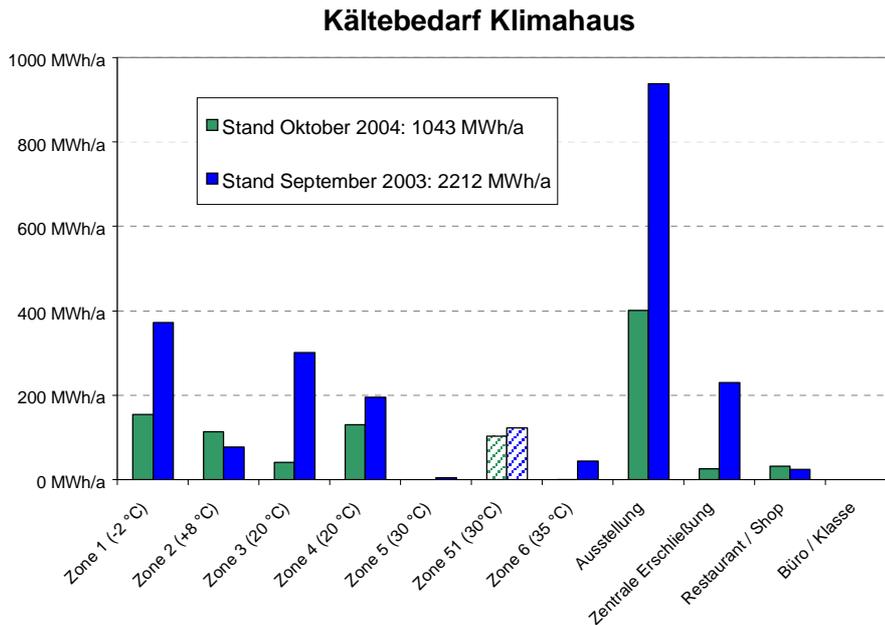


Abbildung 24: Vergleich des Kältebedarfs Stand Sept. 2003 und Okt. 2004 nach Gebäudezonen

Abbildung 24 zeigt einen Vergleich des Kältebedarfs für den Stand September 2003 und Oktober 2004, aufgeteilt nach Gebäudezonen.

Man erkennt, dass sich in praktisch allen Gebäudezonen der Kältebedarf gegenüber dem Stand von September 2003 teilweise drastisch reduziert hatte. Dies konnte durch die innerhalb des Planungsprozesses vorangetriebene Überarbeitung der internen Wärmelasten hin zu realistischeren Werten und eine Anpassung der Klimaanforderungen und Raumgrößen erreicht werden. Räumlich vergrößert hat sich im Wesentlichen nur die Zone 2 der Reise. Eine Verdopplung der Raumgröße und Personenzahlen (+100 %) führte hier zu einer Erhöhung des Kältebedarfs von etwa 30 %.

### 3.2.5 Potential des regenerativen Anteils am Kältebedarf – Vergleich mit konventioneller Planung

Neben der Reduzierung des Kältebedarfs durch eine kritische Analyse der Randbedingungen bestand ein Schwerpunkt der konzeptionellen Arbeit in einer Optimierung des aus regenerativen Energiequellen bereitzustellenden Anteils am Gesamtkältebedarf. Dies konnte in erster Linie durch die eingehenden Untersuchungen am Beispiel der „Elemente“ erreicht werden (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Erst durch eine genauere Bewertung der anzusetzenden internen Wärmelasten, die von den zum Stand September 2003 pauschal angesetzten 65 W/m<sup>2</sup> auf etwa 48 W/m<sup>2</sup> (Beispiel Gesamtbereich „Elemente“, vergleiche Tabelle 4) reduziert werden konnten, war es möglich, die Integration einer Bauteilaktivierung zur Abfuhr dieser Wärmelasten realistischer zu beurteilen und den Einsatz von Umluftkühlung in diesen Bereichen (weitgehend) zu vermeiden. Eine weiterführende Konkretisierung unter Berücksichtigung einzelner Raum- und Exponat-situationen erfolgte innerhalb der Ausführungsplanung.

Abbildung 25 veranschaulicht am Beispiel des Ausstellungsbereiches (Summe aller Ausstellungsflächen mit „Elemente“, „Perspektiven“, usw.), dass hier eine Reduktion des mechanischen Anteils am Kältebedarf insgesamt etwa um den Faktor 4 erzielt werden konnte.

Der verbleibende Kühlenergiebedarf zur Spitzenkühlung der mechanischen Zuluft (mechanische Kälte) konnte im Verlauf der weiteren Projektbearbeitung vollständig durch die thermische Nutzung von Energiepfählen ersetzt werden (siehe Abschnitt 3.3.2.3.)

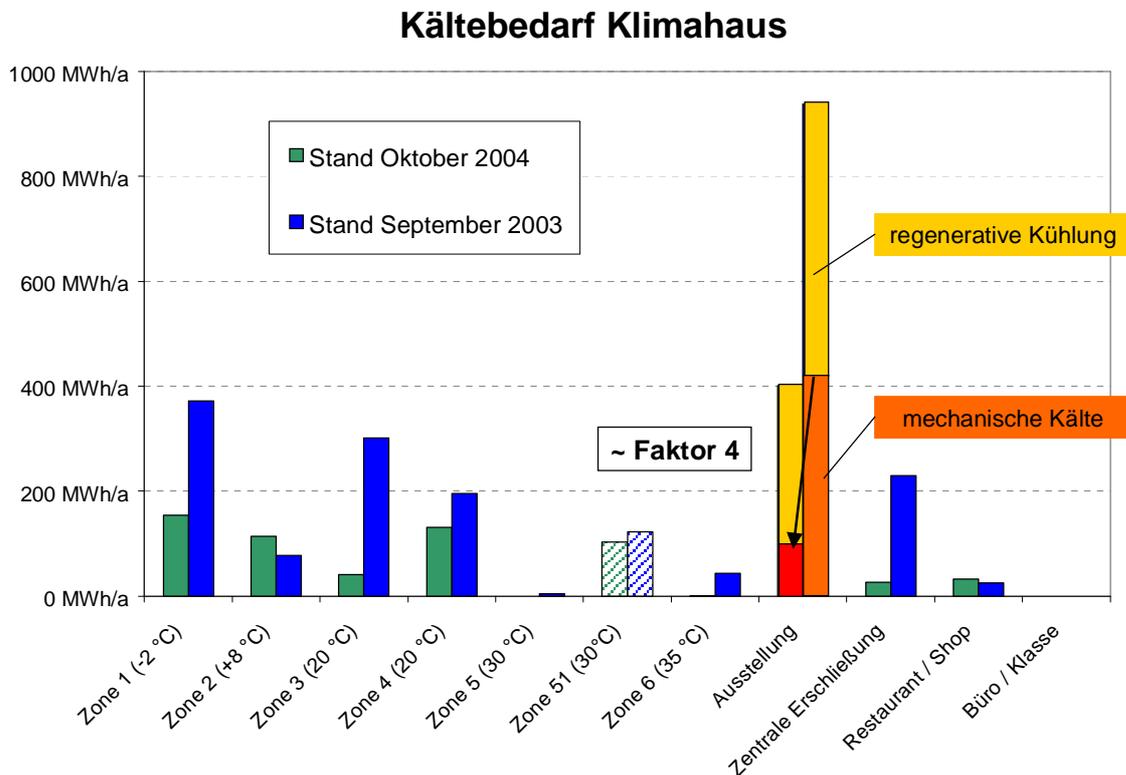


Abbildung 25: Vergleich des Kältebedarfs Stand Sept. 2003 und Okt. 2004 nach Gebäudezonen mit Kennzeichnung des regenerativen und mechanischen Anteils für den Ausstellungsbereich (Stand Okt. 2004)

### 3.3 Planung des Energieversorgungskonzepts

#### 3.3.1 Analyse der Energiebedarfs

Für die Entwicklung geeigneter Versorgungskonzepte wurde zunächst das Kälteniveau auf 4 verschiedene Versorgungstemperaturen aufgeteilt, da diese Niveaus durch unterschiedliche Systeme bzw. Technologien bereitgestellt werden können:

- -12/-8 °C Eiswasser
- 6/12 °C Kaltwasser
- 10 °C Kühlwasser (Hybridkühlturm)
- 18 °C Kühlwasser (Hybridkühlturm)

Das Wärmeniveau wurde zunächst als einheitliches Temperaturniveau mit maximal 90 / 70 °C angenommen.

Die resultierenden Jahresdauerlinien zeigt Abbildung 26.

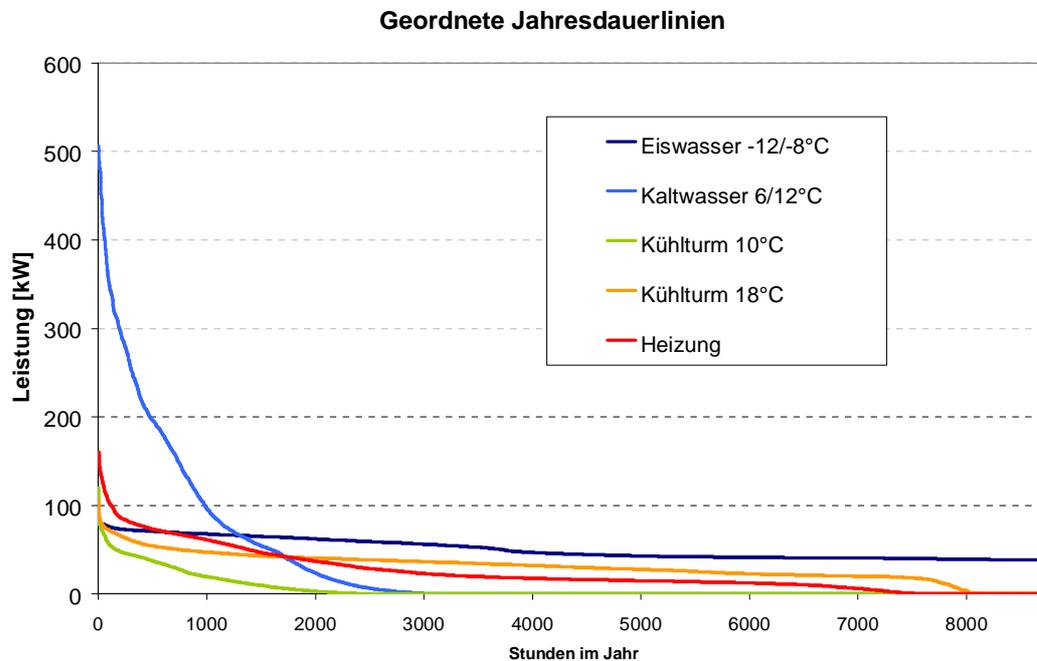


Abbildung 26: Geordnete Jahresdauerlinien der Leistungen der verschiedenen Kälteniveaus und der Heizleistung (Stand Nov. 2004)

Auf dieser Basis wurden unterschiedliche Versorgungsszenarien entwickelt und bewertet.

### 3.3.2 Entwicklung und Vergleich verschiedener Energieversorgungs-szenarien

#### 3.3.2.1 Nutzung von Fernwärme und Einsatz dezentraler Kraft-Wärme-Kälte Kopplung

Eine wesentliche Fragestellung hinsichtlich der Energieversorgung bestand in der Auswahl des Primärenergieträgers. Hierbei kamen am Standort Fernwärme und Erdgas in Frage. Daher wurden in 2004 zunächst 8 verschiedene Versorgungsszenarien entwickelt, wovon 2 auf Basis von Fernwärme und 6 Szenarien auf Basis von Erdgas beruhen. Bei den Erdgas-Szenarien wurden auch Möglichkeiten einer gebäudeeigenen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung untersucht.

Sowohl bei der Nutzung von Fernwärme als auch von Erdgas besteht die prinzipielle Möglichkeit, Wärmeenergie zur Erzeugung von Kälte einzusetzen. Dies hat den Vorteil, dass elektrischer Strom zur Kälteerzeugung primärenergetisch günstig durch thermische Energie

ersetzt wird. Ferner wird das Wärmeprofil zeitlich vergleichmäßigt und so der Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung begünstigt.

Die entsprechenden Technologien bestehen dabei im Bereich der Sorptionstechnik, und zwar

- Adsorptionstechnik (Desiccant Cooling System, DCS) und
- Absorptionstechnik (Absorptionskältemaschinen), AKM

Wie sich das Wärmebedarfsprofil ändert, wenn diese Technologien zur Deckung des Kältebedarfs (z.B. für die Frischluftkonditionierung in den Reise-Zonen 3 und 4 (DCS) sowie zur Kaltwassererzeugung) eingesetzt werden, zeigt der Vergleich von Abbildung 22 und Abbildung 27).

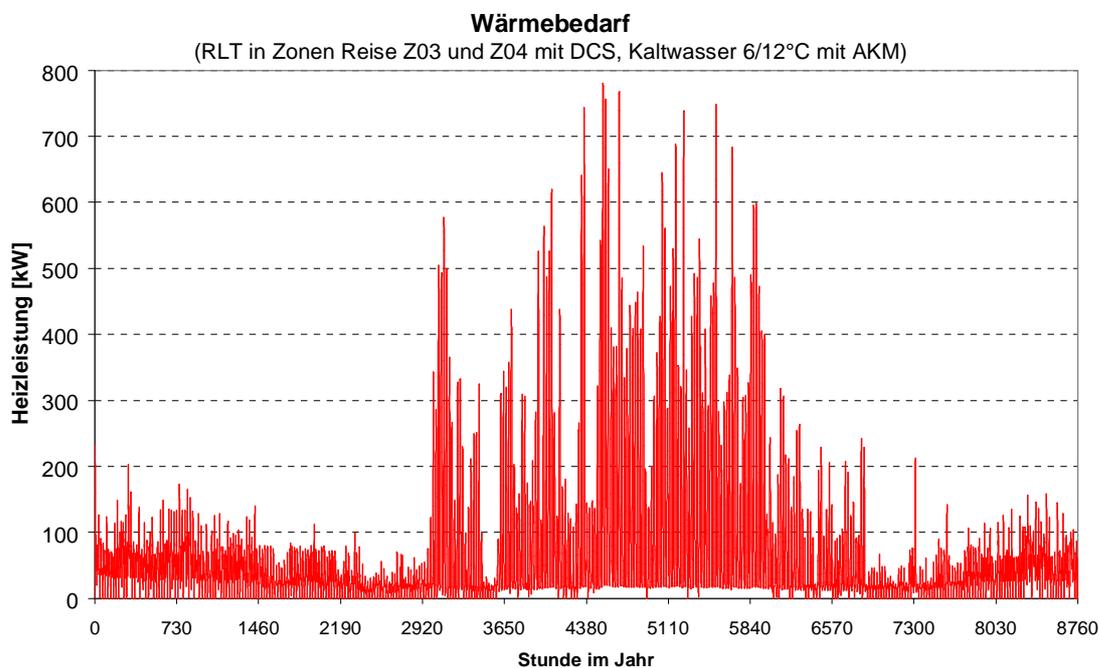


Abbildung 27: Zeitprofil Wärmebedarf mit Wärmeverschiebung für DCS und Kaltwassererzeugung 6/12°C

### 3.3.2.2 Untersuchte Versorgungsszenarien, Stand November 2004

Folgende Versorgungsszenarien wurden detailliert untersucht:

- Versorgungskonzept 1: Strom und Fernwärme
- Versorgungskonzept 2: Strom und Fernkälte
- Versorgungskonzept 3: Strom und Erdgas
- Versorgungskonzept 4: Strom und Erdgas mit Absorptionskälte (Gas-direktgefeuert)

- Versorgungskonzept 5: BHKW und Absorptionskälte für Kaltwasser 6/12°C
- Versorgungskonzept 6: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C
- Versorgungskonzept 6A: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C
- Versorgungskonzept 6B: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C

Schemabilder und Kurzbeschreibungen der in diesem Zusammenhang untersuchten Versorgungsszenarien sind im Anhang (A) dargestellt. Auf die Beschreibung von Einzelheiten und der umfangreichen Untersuchungen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Sie sind in den dazu angefertigten Berichten detailliert dokumentiert (siehe [3], sowie auch [5]).

Für eine Gesamtbewertung der Versorgungsszenarien als Grundlage für eine Systementscheidung wurden die hier untersuchten Kriterien

- Energieaufwand / jährliche Energiekosten
- Investitionsaufwand
- Gesamtkosten
- CO<sub>2</sub>-Emissionen und
- technischer Aufwand

in der nachfolgenden Matrix zusammenfassend gegenübergestellt. In dieser Betrachtung führen die Szenarien 1, 6 A und 6B etwa zu einer Gleichbewertung.

Entscheidungsmatrix Energieversorgungsvarianten  
Stand: Okt. 2004

Szenario / Kriterium	Variante 1 Fernwärme (FW)	Variante 2 Fernwärme mit FW für Kälte (FW-AKM)	Variante 3 Gas	Variante 4 Gas mit Gas für Kälte (Gas-AKM)	Variante 5 Gas (BHKW für Kaltwasser 6/12 °C)	Variante 6 Gas (BHKW für Eiswasser -12/-8 °C)	Variante 6A Gas (BHKW für Eiswasser -12/-8 °C)	Variante 6B Gas (BHKW für Eiswasser -12/-8 °C)
Energieaufwand /-kosten	-	0	-	0	+	++	+	++
Investitionsaufwand	++	--	++	--	-	--	-	--
<b>Gesamtkosten</b>	<b>0</b>	<b>--</b>	<b>0</b>	<b>--</b>	<b>0</b>	<b>+</b>	<b>+</b>	<b>0</b>
CO <sub>2</sub> -Emissionen	<b>0</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>++</b>	<b>+</b>	<b>++</b>
technischer Aufwand	<b>++</b>	<b>-</b>	<b>++</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>--</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>+</b>	<b>+</b>

++ = sehr günstig, 0 = neutral, -- = sehr ungünstig

Als wesentliche Resultate der wirtschaftlichen, ökologischen und technischen Bewertung (siehe auch Anhang B und C) sind zu nennen, dass

- das reine Fernwärme-Szenario (Variante 1) sowie das dazu analoge Szenario auf Erdgas-Basis (Variante 3) den geringsten Investitionsaufwand auslösen.
- alle übrigen Szenarien, die Absorptionstechnik zur Kälteerzeugung einsetzen (Varianten 2, 4, 5, 6 und 6A/B), deutlich höhere Investitionskosten aufweisen.
- der erhöhte Aufwand bei den Investitionen durch Einsparungen bei den Energiekosten nur unter Berücksichtigung der Stromgutschrift aus dem BHKW-Betrieb für den Fall einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Einsatz von Absorptionstechnik zur Eiswassererzeugung (Variante 6 und 6A) derart überkompensiert werden kann, dass im Vergleich mit Variante 1 insgesamt ein positives wirtschaftliches Gesamtergebnis entsteht.

- aufgrund der günstigen (emissionsfreien) ökologischen Bewertung der Fernwärme aus Müllverbrennung ebenfalls nur unter Berücksichtigung der Stromgutschrift aus dem BHKW-Betrieb in den Varianten 6 und 6A/B deutliche Einsparungen bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber Variante 1 erzielt werden.
- das reine Fernwärme-Szenario (Variante 1) die technisch einfachste, aber auch unflexibelste Lösung darstellt.
- der Einsatz von Erdgas die Möglichkeit einer Nutzung der Notstromversorgung als BHKW-System erlaubt.
- die Nutzung von Absorptionskälte zur Eiskälteerzeugung mit einer einzelnen Ammoniak-Kältemaschine in Kombination mit einem BHKW eine teure, technisch aufwändige und bei Antriebstemperaturen im Bereich von 80-90 °C noch wenig verbreitete Technik darstellt.
- die Nutzung von Absorptionskälte zur Eiskälteerzeugung mit Standardkomponenten effizient möglich ist, wenn mehrstufige Prozesse eingesetzt werden. Dabei ist eine Kombination mechanischer und thermischer wie auch rein thermischer Kälteerzeugung unter Ausnutzung von BHKW-Abwärme möglich.

Insgesamt kann aus Sicht der Verfasser wurde auf der Grundlage der hier dargestellten Ergebnisse hinsichtlich des Energiekonzepts im November 2004 folgende Empfehlung gegeben:

1. Wichtig ist, dass das erarbeitete natürliche Klima- und Komfortkonzept mit den darin enthaltenen Elementen für die betrachteten Bereiche „Elemente“, „Perspektiven“ und „Zentralbereich“ im Klimahaus während der weiteren Planungsphasen umgesetzt wird und die damit erreichten Einsparungen beim Energiebedarf und der Nutzung regenerativer Energiequellen wirksam werden.
2. Vor dem Hintergrund des komplexen Gesamtplanungsprozesses des Klimahauses erscheint das Versorgungsszenario 1 („reine“ Fernwärme), das technisch unproblematisch ist und den Fachplanern vertraute Techniken und Komponenten einsetzt, empfehlenswert.
3. Unter Inkaufnahme einer erhöhten technischen Komplexität durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung lassen sich erhebliche Einsparungen bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Energiebedarf erzielen und die ökologische Bilanz der Energieversorgung des Klimahauses signifikant verbessern. Unter diesem Gesichtspunkt ist zu den Versorgungsszenarien 6A bzw. 6B zu raten.

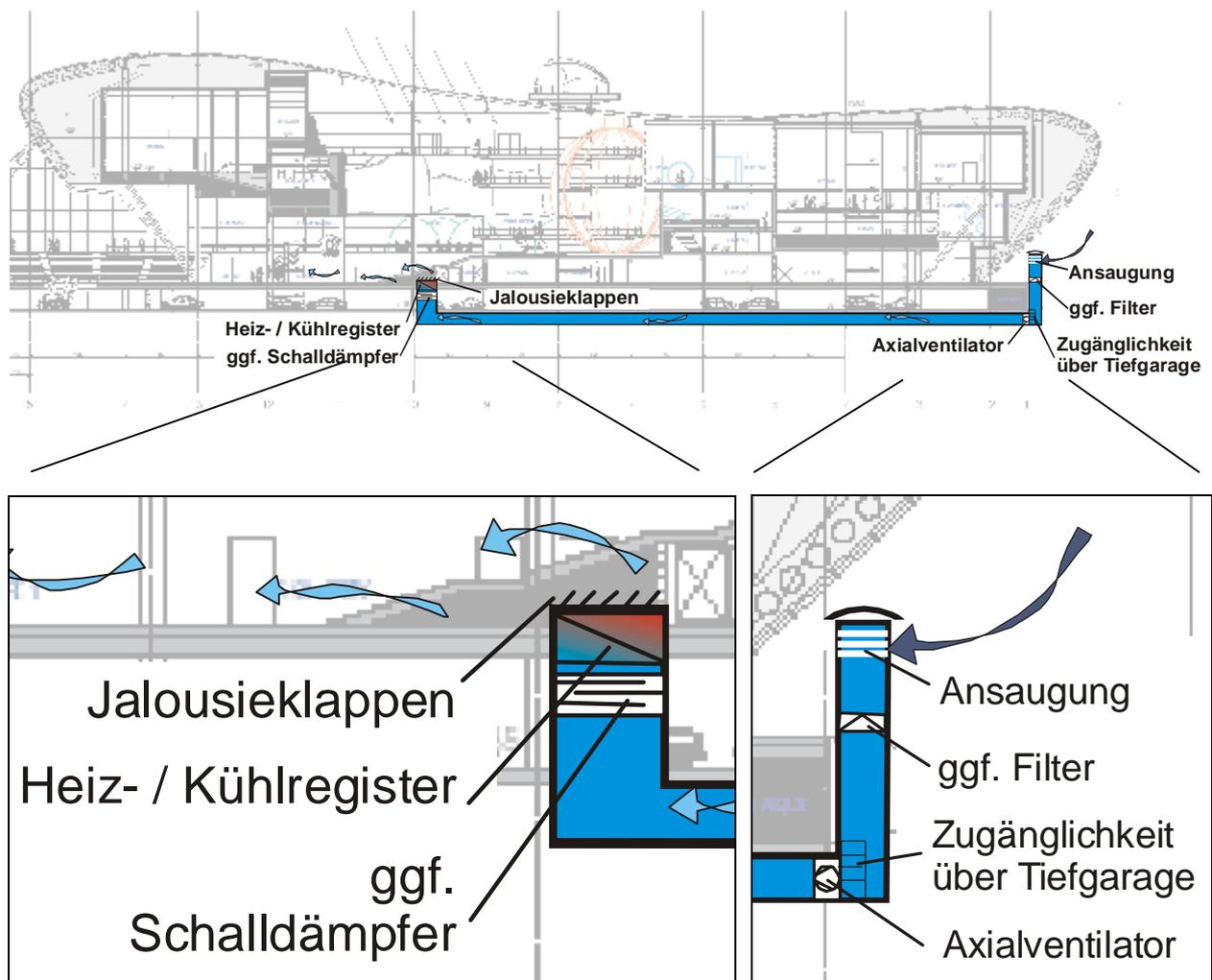
Aufgrund technischer und wirtschaftlicher Erwägungen sowie dem politischen Wunsch, verstärkt die aus dem Müllheizkraftwerk der Bremerhavener Entsorgungsgesellschaft mbH (BEG) zur Verfügung stehende Fernwärme einzusetzen, deren jahreszeitlich gleitende Fahrweise (Vorlauftemperatur) allerdings eine zuverlässige und durchgängige Erzeugung von Klimakälte erschwert, wurden im Verlauf der weiteren Planungen in 2005 weiterführende Szenarien entwickelt und untersucht (siehe auch 3.3.3) [5].

Parallel zu diesem Prozess wurden verschiedene weitere mögliche Konzeptelemente entwickelt und untersucht, die im Folgenden beschrieben werden.

### 3.3.2.3 Thermische Nutzung des Untergrundes

#### *Erdkanal zur Frischluftkonditionierung*

Für den großen atriumsähnlichen Zentralbereich, bestehend aus Foyer, Zentraler Erschließung und den beiden Schluchten, wurde die Lüftungstechnische Erschließung mittels eines Erdkanals vorgeschlagen, der als rein passives Bauelement zur Energieversorgung für die Frischluftkonditionierung in diesem Bereich beiträgt. Abbildung 28 zeigt eine schematische Darstellung.



*Abbildung 28: Gebäudelängsschnitt G-G mit Lage des Erdkanals und möglicher Anordnung der technischen Einrichtungen, schematische Darstellung, nicht maßstäblich*

Für das Erdkanalsystem erfolgte eine Vordimensionierung, der ausführliche simulationsmäßige Funktionsnachweis und Bewertung sowie die Klärung der technischen und baulichen Anforderungen [7].

Aufgrund der örtlichen Grundwassersituation sowie der mangelnden Erfahrung der beteiligten Fachplaner konnte mit der ausführenden Rohbaufirma keine Einigung über eine wirtschaftlich vertretbare Umsetzung erzielt werden, so dass kurz vor der Rohbauvergabe im Mai 2005 die Integration eines Erdkanals aufgegeben werden musste und unter hohem Zeitdruck eine Alternative zur regenerativen Kühlung der Zuluft entwickelt werden musste.

### *Energiepfähle*

Nach Wegfall des Zuluft-Erdkanals für den Bereich der Zentralen Erschließung / Foyer wurden alternative Konzepte zur Nutzung oberflächennaher Geothermie erwogen. Nachdem das gesamte Gebäude aufgrund der Bodenverhältnisse auf mehreren Hundert Betonpfählen gegründet werden muss, wurde untersucht die Ausbildung der Gründungspfähle als Energiepfähle zur regenerativen Kühlung in das Energieversorgungskonzept zu integrieren.

Anders als der Zuluft-Erdkanal, der ausschließlich den Bereich der Zentralen Erschließung / Foyer mit vorkonditionierter Frischluft versorgt hätte, wurde ein Energiepfählfeld ausgelegt, dass in folgenden Gebäudebereichen zur Kühlung eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 29):

- Zentrale Erschließung / Foyer: - Kühlung Zuluft  
- Fußbodenkühlung
- Elemente : - Kühlung Zuluft  
- Kühldecken
- Perspektiven : - Kühlung Zuluft  
- Kühldecken

Grundsätzlich wurde weiter der Ansatz verfolgt, dass die Kühlung für diese Bereiche zunächst das Kühlpotential der Außenluft direkt nutzt bzw. über Kühlturm betrieben wird, solange dies möglich ist. Erst wenn die Außenluftbedingungen dies nicht mehr zulassen, kommt das Energiepfählfeld zum Einsatz.

Damit beschränkt sich dessen Betrieb auf die wärmsten Zeiten im Jahr zur „Spitzenkühlung“.

Die Bauteilaktivierung wird nicht über die Energiepfähle betrieben.

Anders als bei mechanisch erzeugter Kälte schwankt aufgrund der variablen thermischen Bedingungen im Erdreich die Leistungsfähigkeit und speziell die Rücklauftemperatur aus dem erdreichgekoppelten System im Jahreszyklus und in Abhängigkeit der thermischen Last, so dass eine genaue Abstimmung der Systeme erforderlich ist (siehe Abbildung 30).

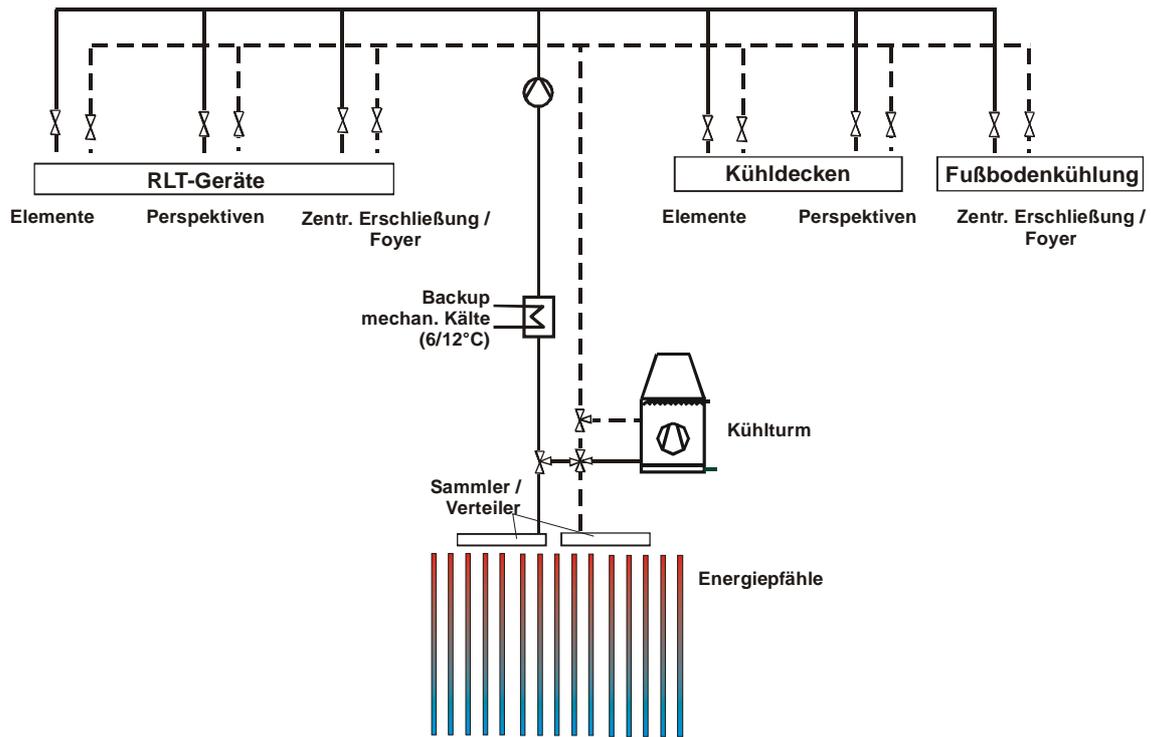


Abbildung 29: Prinzipielles hydraulisches Konzept zur Einbindung der Energiepfähle

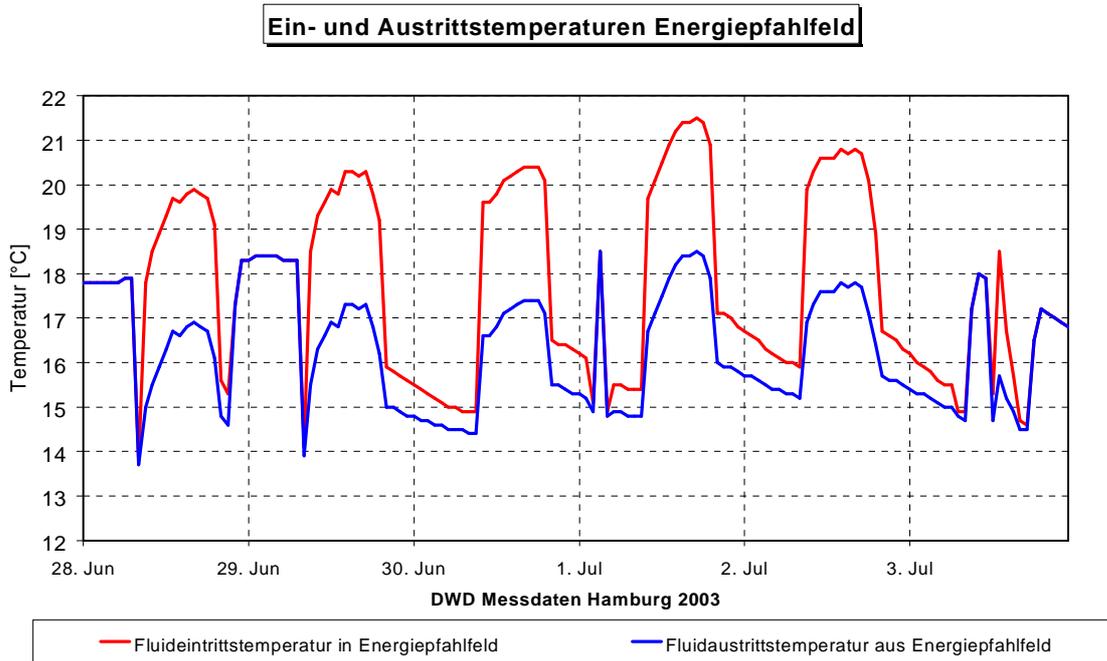


Abbildung 30: Beispiel des Temperaturverlaufs am Eintritt und Austritt des Energiepfahlfelds

Auch für dieses Konzept wurden ein Funktionsnachweis sowie eine Bewertung mittels gekoppelter dynamischer Gebäude- und Systemsimulation durchgeführt, die eine Entscheidungsgrundlage für den Betreiber bot. So konnte etwa gezeigt werden, dass die Kühlung der Zuluft über das Geothermiefeld im Bereich der Elemente nur zu unwesentlich wärmeren Temperaturzuständen im Raum führt als bei Bereitstellung aus mechanischer Kühlung (siehe Abbildung 31).

Für das Energiepfahlfeld wurde Anfang Juli 2005 eine Vordimensionierung, ein simulationsmäßiger Funktionsnachweis des Konzeptes und Bewertung sowie die technische Klärung der technischen und baulichen Anforderungen erbracht [8].

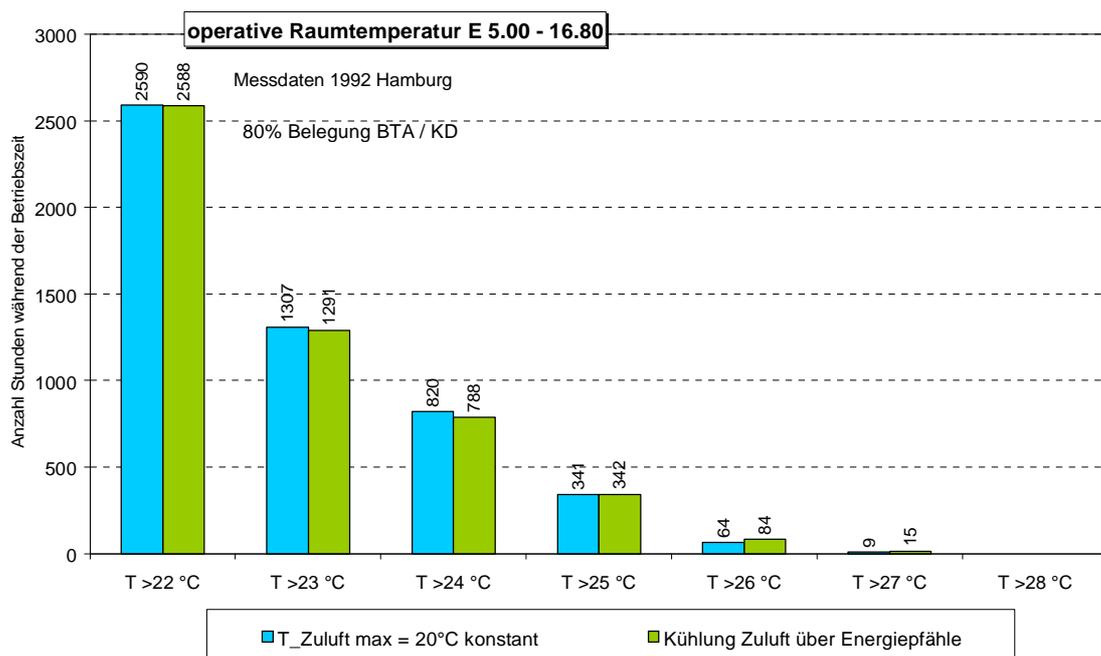


Abbildung 31: Vergleich der Jahres-Temperaturstatistiken Zone 1 der „Elemente“ (mit Bauteilaktivierung, BTA) bei Einsatz des Geothermiefeldes zur Zuluft-Kühlung im Vergleich zu Bereitstellung einer konstanten Kühlung der Zuluft aus mechanischer Kälteerzeugung

### 3.3.2.4 Thermische Nutzung des Weserwassers

Der Standort des Klimahauses in unmittelbarer Nähe zur Wesermündung legte die Möglichkeit nahe, das Flusswasser zu Kühlzwecken einzusetzen. Denkbar erschien sowohl eine direkte Nutzung zur Kühlung in Flächenkühlsystemen (Bauteilkühlung) als auch der Einsatz zur Rückkühlung der verschiedenen Kälteaggregate. Der Vorteil einer solchen Flusswasserkühlung läge v. a. in der einfachen und u. U. kostengünstigen Verfügbarkeit der Kühlenergie über ein Entnahgebauwerk und der damit verbundenen Möglichkeit, auf Kühltürme verzichten zu können. Mögliche technische Randbedingungen bei der Umsetzung wären in einem weiteren Schritt zu prüfen gewesen.

Wichtigster Parameter bei der Beurteilung dieses Kühlpotentials ist die nutzbare Wassertemperatur. Daher wurde in umfangreiche Recherchearbeit investiert, um verlässliche Messdaten zur Wassertemperatur und gleichzeitig gemessener Lufttemperaturen und Feuchten zu erhalten, u.a. beim Senator für Bau und Umwelt der Stadt Bremen, dem Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven. Im Juli 2004 führte Transsolar außerdem eigene Vor-Ort-Messungen durch.

Unter Berücksichtigung hydraulisch notwendiger Komponenten (Wärmetauscher) konnte dann ermittelt werden, ob sich aus der Nutzung des Weserwassers gegenüber dem Einsatz von Kühltürmen energetische Vorteile ergeben würden. Eine quantitative Analyse des Temperaturvergleichs aus der Weser und aus einem Kühlturm zeigt Abbildung 32. Dargestellt ist hier die tatsächlich gemessene Differenz der Nutzttemperaturen (sekundärseitig) aus der Weser und aus einem Kühlturm als zeitlicher Verlauf über das Jahr 2001. Der grüne Bereich kennzeichnet Zeiten, während denen aus dem Kühlturm eine niedrigere Temperatur als aus der Weser zur Verfügung stand, der rote Bereich den gegenteiligen Fall.

Entscheidend ist dieser Vergleich für die kritischen Sommermonate, da außerhalb dieser Zeit ohnehin aus der Umwelt ausreichend Kühlpotential zur Verfügung steht. Für die Zeit von Mai bis August lieferte demnach ein Kühlturm während 80 % (2320 h) der Zeit eine niedrigere Temperatur als das Kühlmedium Weserwasser.

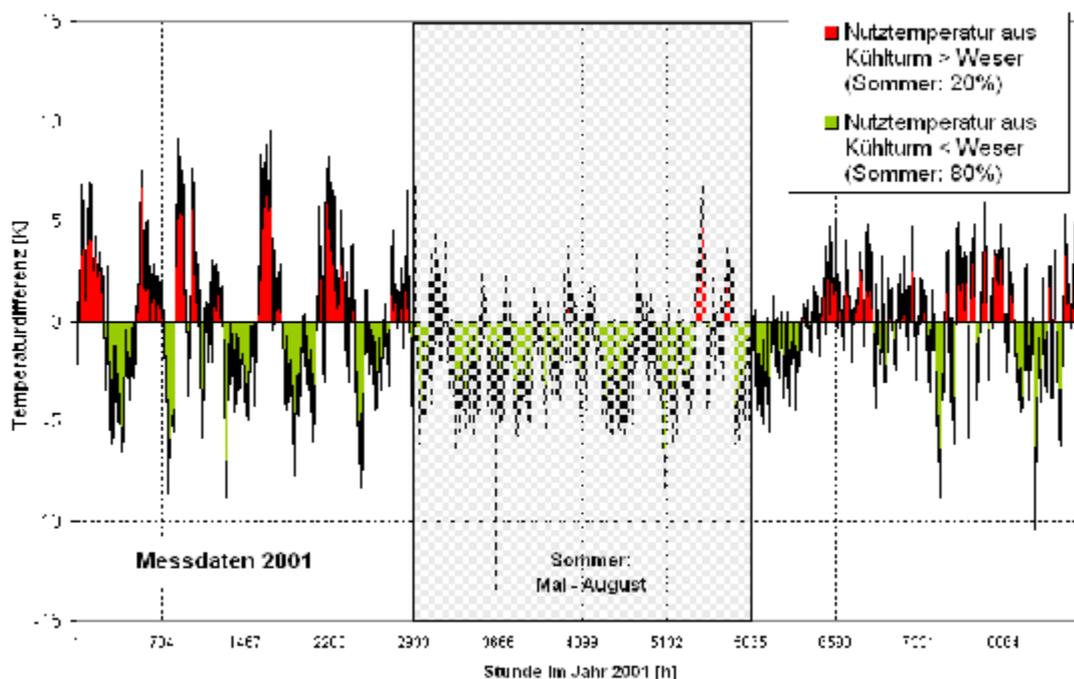


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Nutztemperatur (sekundärseitig) aus der Weser und aus einem Kühlturm auf Basis von Messdaten aus dem Jahr 2001. Während der grünen Bereiche stand aus einem Kühlturm eine niedrigere Nutzttemperatur als aus der Weser zur Verfügung

Als Ergebnis zeigte sich, dass eine Nutzung des Weserwassers zu Kühlzwecken gegenüber der Nutzung des Kühlpotentials der Außenluft (Kühlturm) aus thermischer / energetischer Sicht keine Vorteile erwarten lässt. Für die freie Kühlung wurden daher Kühltürme für das Energiekonzept vorgeschlagen.

### 3.3.2.5 Nutzung von Photovoltaik

Bereits in einem frühen Projektstadium existierte die Idee, solare Stromerzeugung in das Konzept zu integrieren. Eine gebäudeintegrierte Lösung bot sich an. Aufgrund der klimatischen Bedingungen des Standorts war klar, dass sich nur eine sehr begrenzte Energiemenge würde gewinnen lassen.

Das Konzept sah vor, trotzdem eine darstellbare Integration und öffentlichkeitswirksame Präsentation als beispielhafte Lösung anzustreben. Ziel war es, einen konkreten, räumlich begrenzten Bereich des Klimahauses mit vor Ort solar erzeugtem Strom als netzgekoppelte Anlage zu versorgen und dies ins Gebäude zu integrieren.

Als geeigneter Standort erwies sich der vollständig verglaste Übergangs- und Erschließungsbereich („Plaza“) des Klimahauses und des angrenzenden Einkaufszentrums. Hierfür wurden verschiedene Varianten einer glasintegrierten PV-Anlage konzipiert und schließlich eine Photovoltaik-Anlage im Dach der Plaza mit einer Peakleistung von ca. 35 kWp geplant, die neben der Stromerzeugung auch die Verschattung des Plaza-Bereiches leistet.

Im Gesamtzusammenhang des Klimahauses ist die PV-Anlage hauptsächlich als Demonstrationsanlage einer gelungenen Gebäudeintegration konzipiert, bietet in dieser Hinsicht jedoch – auch bei vergleichsweise geringer Gesamtleistung – einen wichtigen inhaltlichen Gesichtspunkt.

## 3.3.3 Ergebnis

### 3.3.3.1 Das umgesetzte Energieversorgungskonzept

Am Ende dieses vielschichtigen Entwicklungs- und Entscheidungsprozesses steht das Energieversorgungskonzept wie es in Abbildung 33 schematisch dargestellt ist.

In diesem Konzept wird die maximale Ausnutzung des speziell an diesem Standort hohen Freikühlpotentials über Kühltürme umgesetzt. Insbesondere die BTA wird über die Kühltürme betrieben. Darüber hinaus wird die unmittelbare Integration von Umweltenergie über ein Geothermiefeld für die Spitzenkühlung der Zuluft in Zeiten hoher Außenlufttemperaturen und für die Vorerwärmung im Winter eingesetzt. Es kommt keine Wärmepumpe zu Einsatz. Damit sind alle Ausstellungsbereiche außerhalb mit einer vollständig natürliche Kühlkonzept ohne den Einsatz von mechanischer Kälte versorgt.

Fernwärme aus dem Müll-Heizkraftwerk Bremerhaven dient zur Beheizung und wird auch zur Kälteerzeugung über die AKM und DCS eingesetzt. Unter Erweiterung der Bilanzgrenze auf das Müll HKW wird damit im Prinzip eine Kraft-Wärme-Kälte Kopplung aus zentraler Wärmeversorgung aus dem HKW umgesetzt. Eine Photovoltaik-Anlage liefert elektrischen Strom.

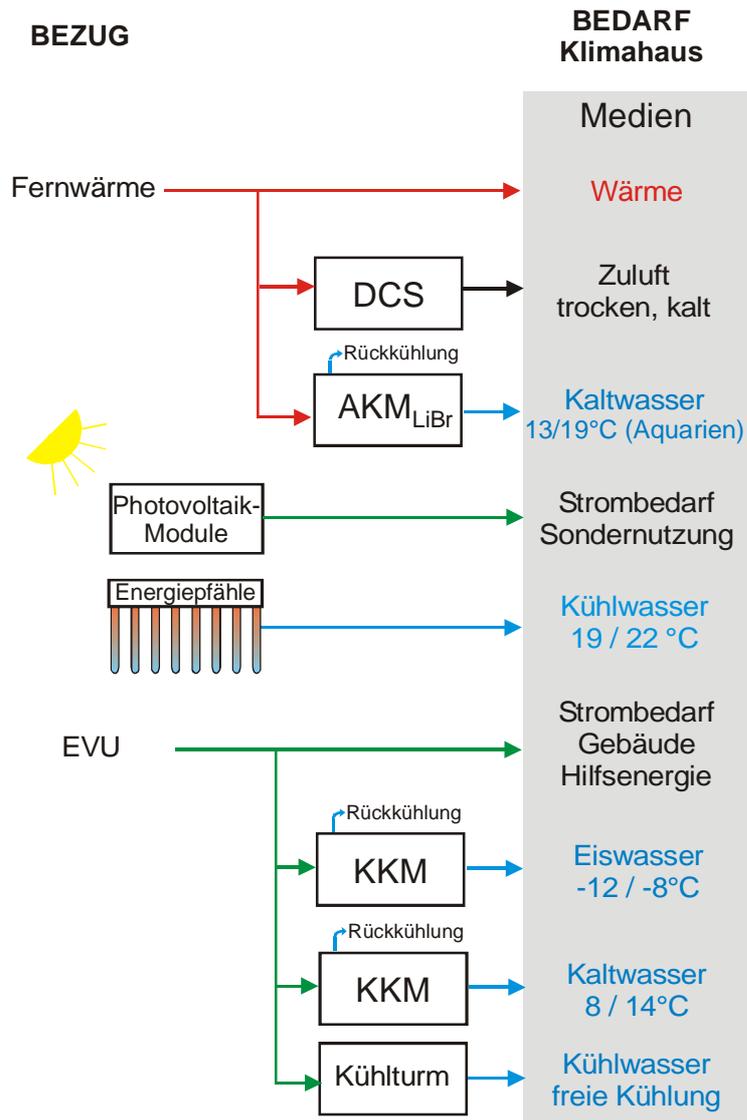


Abbildung 33: Schematische Darstellung des umgesetzten Energieversorgungskonzepts

### 3.3.3.2 Das umgesetzten Klima und Energiekonzept

Zur Beschreibung siehe auch Abschnitt 3.2.3.

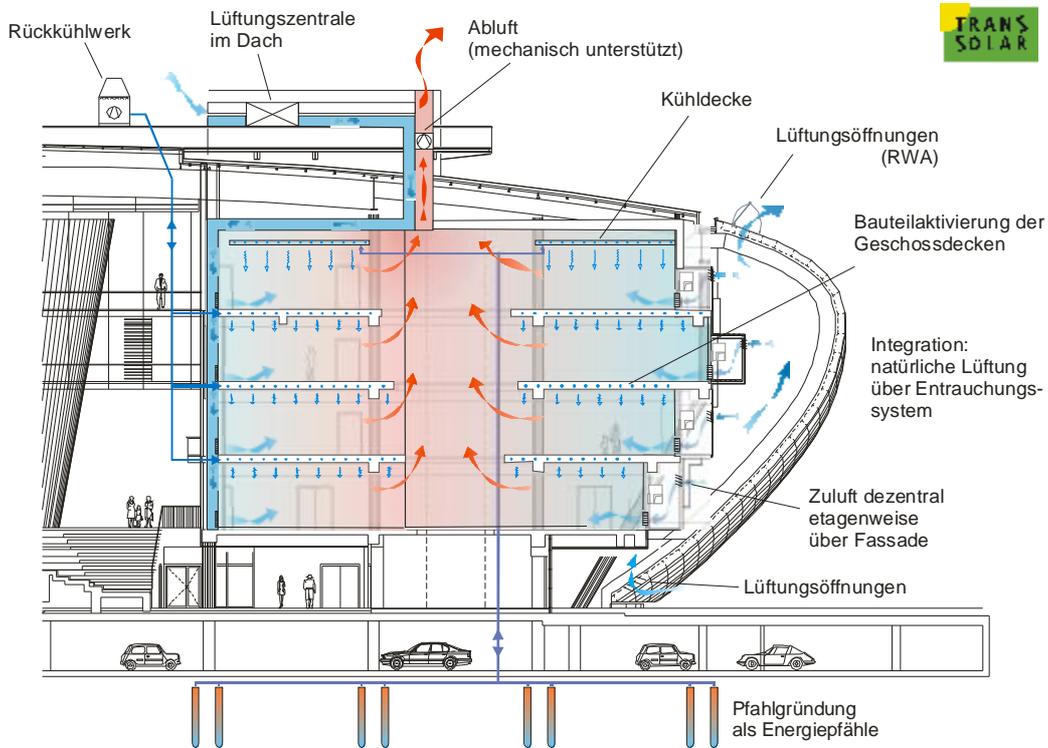


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Klima- und Energiekonzepts für den Ausstellungsbereich „Elemente“ im Sommerfall

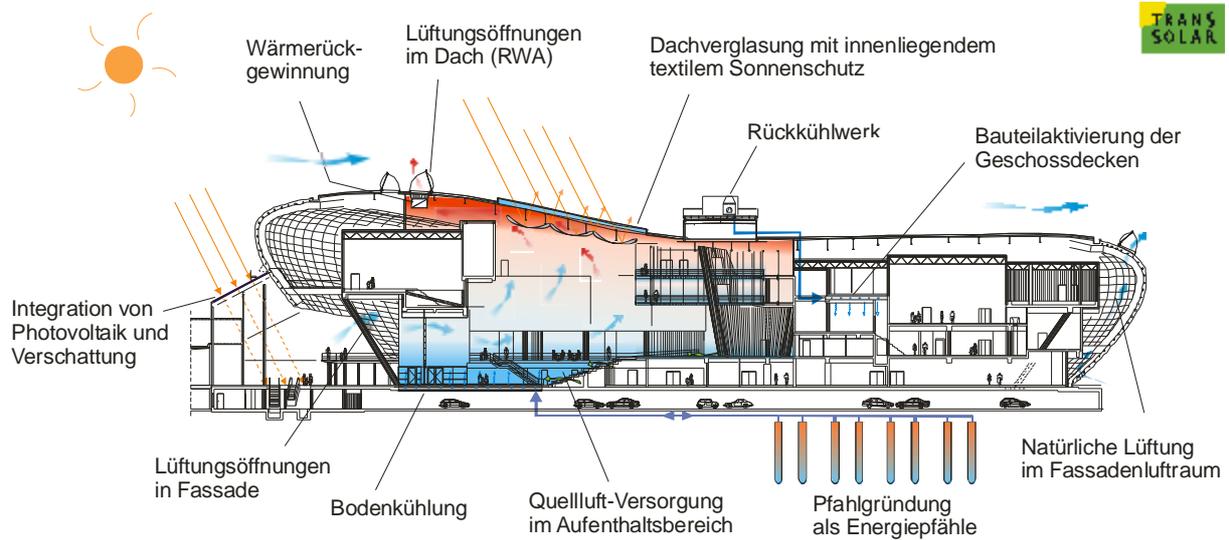


Abbildung 35: Schematische Darstellung einiger Elemente des Klima- und Energiekonzepts im Längsschnitt durch das Klimahaus

## **3.4 Umsetzung der Planung**

### **3.4.1 Definition und Dokumentation von Anforderungen für die Umsetzung**

Ausgehend von den definierten Konzepten wurden für die betroffenen Bereiche Dokumentationen der baulichen und technischen Anforderungen und Dimensionierungen als Grundlage für die konkrete Umsetzung erstellt („Anforderungskatalog“).

Aufgrund der engen Verzahnung mit anderen Planungsbereichen (z.B. Integration der Lüftungsöffnungen in die Ausstellungsgestaltung) war in der Ausführungsphase eine enge Abstimmung innerhalb des Planungsteams erforderlich. Folgende Bereiche seien beispielhaft genannt:

- Fassade: Lüftungsöffnungen zur Hinterlüftung der Glasfassade und zur natürlichen Lüftung der innen liegenden Gebäudeteile (Dimensionierung, Anordnung, Verteilung bereichsweise), Bedruckungsgrade der äußeren Glasfassade, Verschattungseinrichtungen
- Lüftungsöffnungen in der Innenfassade: Dimensionierung und Anordnung / Verteilung der Lüftungsklappen
- Bauteilaktivierung: Belegung der Flächen und Koordination bei Konflikten
- Geothermiefeld: Auslegung des Energiepfahlfeldes mittels dynamischer Simulation, Definition der Anforderungen an die technischen Komponenten
- Abstimmung der PV Module und Fassadenraster in der „Plaza“, Scheibenintegration der PV Module, Systemintegration
- Steuerung / Regelung: Anforderungen an die Steuer- und Regelungstechnik der Konzeptelemente, Definition der relevanten Betriebszustände und deren Implementierung (insbesondere bezüglich der natürlichen Lüftung, Bauteilaktivierung, Sonnenschutz)

Die von den betroffenen Fachplanern erstellten Leistungsverzeichnisse wurden bzgl. der Einhaltung der Anforderungen überprüft.

### **3.4.2 Konkrete Umsetzung der Konzeptelemente, Beispiele**

Wie einzelne Konzeptelemente tatsächlich umgesetzt worden sind, sei in diesem Abschnitt an einigen Beispielen beschrieben.

### 3.4.2.1 Bauteilaktivierung

Die Bauteilaktivierung der offenen Geschossdecken im Bereich der Elemente und Perspektiven sowie in Teilen der Verwaltungsbüros wurde umgesetzt. Durch die ausstellungsseitig bedingte z.T. hohe Belegungsichte mit Decken-Befestigungssystemen und Installationen erfolgte eine enge Abstimmung mit der Ausstellungsplanung. So konnten die vorgesehenen Belegungsgrade der Bauteilaktivierung im Wesentlichen eingehalten werden.

Im Einzelnen wurden in der Umsetzung folgende Flächenbelegungsgrade erzielt:

Elemente	Ebene +9.20m:	74%
	Ebene +13.70m:	80%
	Ebene +16.80m:	82%
Perspektiven	Ebene +9.20m:	52%
	Ebene +13.70m:	80%
	Ebene +16.80m:	36%

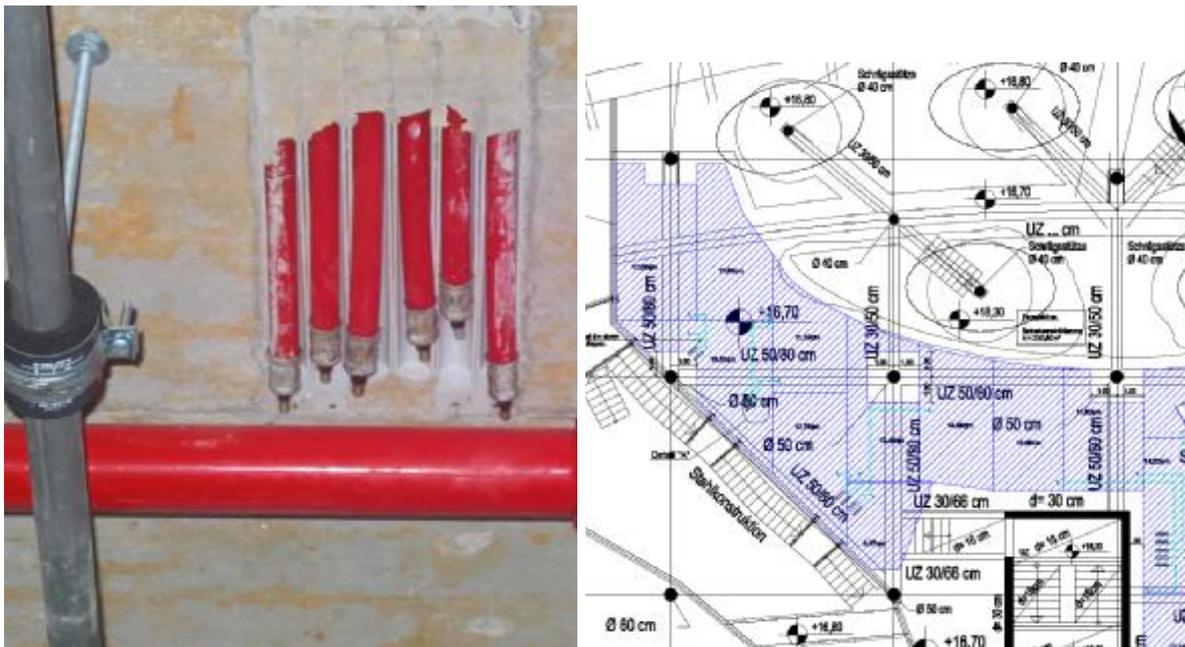


Abbildung 36: Beispiel Anschlussdetail Deckendurchführung der Rohrregister in der Betondecke (links) und Belegungsplan Bauteilaktivierung (rechts)

### 3.4.2.2 Natürliche Lüftung

Die natürliche Lüftung im Bereich der Elemente, Perspektiven und Zentralbereich konnte mit Einschränkungen umgesetzt werden. Die notwendigen, motorisierten Lüftungsflügel in der Außenfassade wurden entsprechend den Vorgaben umgesetzt (siehe Abbildung 37), ebenso die korrespondierenden Lüftungsöffnungen in der Innenfassade (Warmfassade), was sich aufgrund der baulichen Gegebenheiten und teilweise der brandschutztechnischen Erfordernisse als aufwändiger erwies als erwartet (siehe Abbildung 37). Eine freie Abströmung der Abluft im Betriebszustand der natürlichen Lüftung über Dachöffnungen ohne Ventilator konnte aus den genannten Gründen nicht umgesetzt werden.



*Abbildung 37: Motorisierte Fassadenklappen (links) und Lüftungsöffnungen im Raum zum Fassadenzwischenraum für die natürliche Lüftung im Bereich Elemente*

### 3.4.2.3 Geothermiefeld

Das Geothermiefeld wurde als Energiepfahlfeld planmäßig ausgeführt. Von den insgesamt etwa 770 Gründungspfählen sind 464 Stück über eingelegte Rohrschlagen thermisch aktiv. Die hydraulische Einbindung erfolgte wie vorgesehen ausschließlich zur direkten geothermischen Nutzung für verschiedenen Komponenten im den Bereichen Elemente, Perspektiven und Zentralbereich (vgl. Abschnitt 3.3.2.3 und Abschnitt 3.3.3.2).

Zusammen mit der Bauteilaktivierung und der natürlichen Lüftung werden diese Bereiche vollständig ohne den Einsatz mechanischer Kälte klimatisiert. Dieser Konzeptansatz ließ sich bis zur Fertigstellung des Gebäudes durchhalten.



*Abbildung 38: Geothermie in der Umsetzung: Mit Kunststoffrohren belegte Armierungskörbe der Gründungspfähle (oben links), Verlegung der Anbindeleitungen in der Bodenplatte (unten), fertiger Verteilerbalken in der Tiefgarage (oben rechts)*

#### 3.4.2.4 Absorptionskältemaschine

Nachdem die im Abschnitt 3.3.2.1 genannten „großen Lösungen“ zur KWK Kopplung (innerhalb des Klimahauses) und Nutzung von Absorptionskälte auf tiefen Temperaturniveaus aus Fernwärme im Verlauf des Jahres 2005 aufgegeben wurden, konnte im November 2005 eine begrenzte, aber wirkungsvolle Anwendung im Bereich der Aquarien identifiziert werden.

Die Aquarien weisen aufgrund ihrer speziellen Betriebsweise und der großen thermischen Trägheit aufgrund der vorhandenen Wassermengen eine ganzjährig relativ konstante Wärmelast – und damit Kühlbedarf – auf, der zudem fast ausschließlich auf einem moderaten Temperaturniveau (ca. 16 °C) anfällt. Dies kommt dem Einsatz einer Absorptionskältemaschine entgegen, die kompakt und passgenau dimensioniert werden konnte und durchgängig mit hoher Volllaststundenzahl (kaum Teillastzustände) betrieben wird.

Die zur Kühlung der Aquarien nötige Kühlleistung von knapp 90 kW stellt eine Dauerleistung für den Tagbetrieb dar, wenn die Aquarien vollständig in Betrieb sind, insbesondere mit eingeschalteter Beleuchtung. Außerhalb der Betriebszeiten sind die Aquarien nicht beleuchtet und es verbleibt eine Kühlleistung von ca. 45 kW, die nachts als Dauerleistung anliegt.

Damit ergibt sich eine mittlere (24 h/Tag) Dauerleistung für die Kühlung der Aquarien von ca. 65 kW über das ganze Jahr. Ein solches konstantes Kälteprofil ist für den Einsatz einer Absorptionskältemaschine technisch sehr gut geeignet.

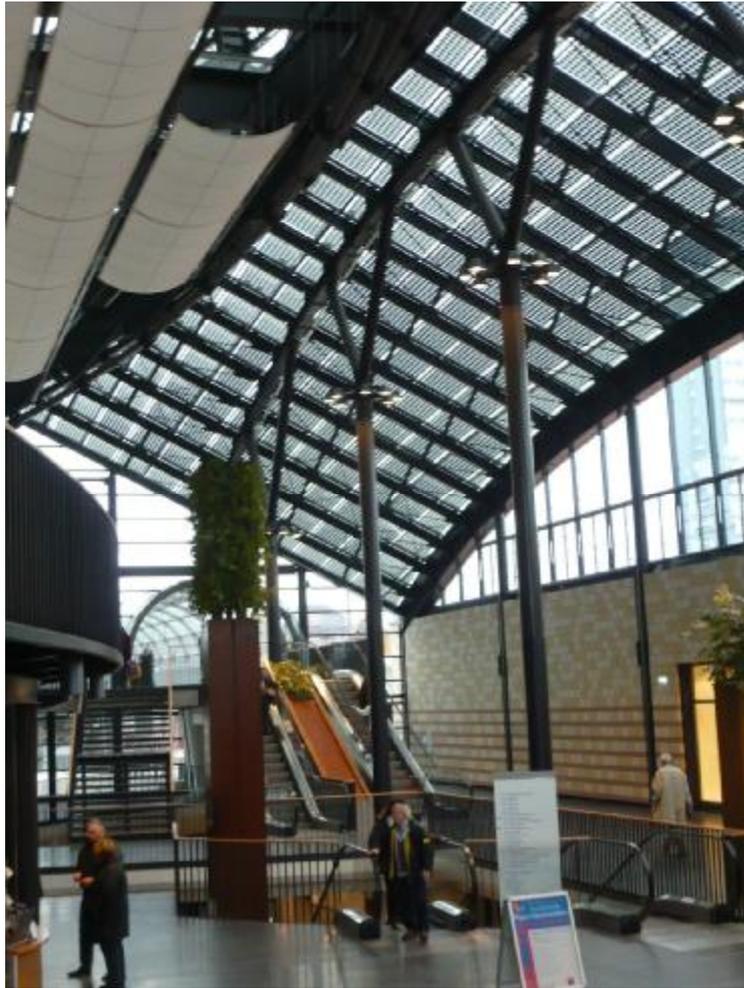
Bei einem Beckenvolumen der Aquarien von insgesamt über 500 m<sup>3</sup> kann dieses Volumen selbst als Speicher eingesetzt werden, um die Tag/Nacht-Schwankung im Kühlbedarf zu puffern. Bei einer konstanten Kälteeinkopplung von 65 kW variiert die Wassertemperatur in diesem Volumen dadurch im gleichen Rhythmus (Tag/Nacht) um weniger als 1 K.

Die geforderten Wassertemperaturen der weitaus überwiegenden Zahl der Aquarien im Bereich von 24 – 26 (28)°C erlauben die Kühlung auf einem höheren als dem bisher veranschlagten Temperaturniveau (6/12°C). Derzeit wird für die Kühlung dieser Aquarien eine Vorlauftemperatur von 13°C angesetzt. Damit können diese Aquarien im Winter sowie in der Übergangszeit über freie Kühlung (Kühlturm) konditioniert werden. Eine Absorptionskältemaschine kommt während der warmen Jahreszeit zum Einsatz und liefert unter diesen Randbedingungen einen Beitrag von 254 MWh/a an Kälteenergie.

Eingesetzt wird eine LiBr-Absorptionskältemaschine vom Typ WFC-SC 30 der Fa. York mit einer Kälteleistung von 65 kW, die mit Fernwärme angetrieben wird (Heizleistung: 84 kW, COP = 0,7).

#### 3.4.2.5 Photovoltaik-Anlage

Die PV-Anlage auf dem Dach der „Plaza“ wurde umgesetzt. Die Anlage besteht aus 143 Isolierelementen, in die monokristalline PV-Zellen der Fa. Solarwatt integriert sind. Die Transparenz der Scheiben wird so auf ca. 18% reduziert und somit eine Verschattungsfunktion erzielt. Die PV-Anlage hat eine Leistung von 37 kW<sub>p</sub>. Der Jahresertrag liegt bei etwa 30 MWh/a.



*Abbildung 39: Fertiggestellte glasintegrierte PV-Anlage im Dach der „Plaza“ erzeugt elektrischen Strom und übernimmt Sonnenschutzfunktion*

## 4 CO<sub>2</sub>-Studie

Zur Zeit der Antragsstellung in 2004 hatte das Thema CO<sub>2</sub> noch nicht die Aufmerksamkeit wie im Jahr 2009. Informationen zur persönlichen CO<sub>2</sub> Bilanz und sogenannte CO<sub>2</sub> Rechner hatte noch keine relevante Verbreitung. In den Jahren der Projektlaufzeit wurden die Bewertungsansätze für Emissionen weiterentwickelt.

Bereits im Jahr 2004 und 2005 wurden für die unterschiedlichen Versorgungsvarianten die Emissionen für das Klimahaus bewertet. Die eingesetzte Wärme wird als Fernwärme geliefert, die aus dem Müllheizkraftwerk Bremerhaven stammt und damit nach damaliger schriftlicher Auskunft der Stadtwerke Bremerhaven ebenfalls als CO<sub>2</sub>-frei anzusehen war. Bereits zum damaligen Zeitpunkt (2005) war klar, dass der Ansatz, die Verbrennung von Müll als vollständig klimaneutral zu betrachten, in der Fachwelt umstritten ist, sich andererseits aber auch aus einer gewissen Bilanzierungslogik ableiten ließ und auch der weitgehend akzeptierten Praxis vieler Versorgungsunternehmen in Deutschland entsprach. (Das Umweltbundesamt (UBA) hat das Thema in der Zwischenzeit eingehend bearbeitet und bewertet nun ausschließlich die Emissionsfaktoren aus Verbrennung von *biogenem* Siedlungsabfall als CO<sub>2</sub> neutral.)

### 4.1 Bewertung spezifischer CO<sub>2</sub> Emissionsfaktoren

Der aus Sicht der Energieversorger und Betreiber von Müll-HKW nachvollziehbare Bewertungsansatz ist – wie erwähnt – nicht unumstritten. Daher wurden zu diesem Thema weitere Recherchen angestellt:

Das **Bundesumweltamt (UBA)** hat eine Studie zur methodisch konsistenten Bewertung von Emissionsfaktoren zur Bereitstellung von Fernwärme beim Ökoinstitut durchführen lassen (UBA)<sup>2</sup>. Hier finden sich Methoden der Bewertung sowie Emissionsfaktoren für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Fernwärme und Strom aus Müll (z.B. für das Jahr 2005). Angegeben sind die nach dem „Wirkungsgrad-Ansatz“ identifizierten Gesamtemissionen in CO<sub>2</sub> Äquivalenten. Diese beinhalten die Emissionen aus dem Brennstoff, aus Hilfsenergien, vorgelagerten Bereitstellungsketten für die Brennstoffe (incl. Transport) und Herstellung der Anlagen (Materialeinsatz).

Eine andere aktuelle Studie enthält Angaben für die Bewertung der Emission für die Energieerzeugung in der **Stadt Bremerhaven (IZES)**<sup>3</sup> (Angaben für das Jahr 2005).

Als weitere Quelle wurden Angaben aus **GEMIS** verwendet (**GEMIS**)<sup>4</sup>.

In Tabelle 6 sind die Angaben zu den spezifischen Emissionen der entsprechenden Endenergie-Träger Strom und Fernwärme gegenüber gestellt. Zum Vergleich sind auch die

---

<sup>2</sup> Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme (UBA), 8/08, ISSN 1862-4359

<sup>3</sup> Basisdaten zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Land Bremen, Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES) GmbH, 14.8.2008

<sup>4</sup> Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.42, Ökoinstitut

Emissionen der Referenzsysteme für Wärme (Gasheizwerk) und Strom (Bundesmix) angegeben<sup>3</sup>. Die Zahlen zeigen grundsätzlich, dass beim Strom bei der Nutzung von Ökostrom aus Wind und Wasserkraft gegenüber diesen Referenzsystemen erwartungsgemäß drastisch geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden sind. Bei der Fernwärme sind die Unterschiede weniger deutlich.

#### **4.1.1 Fernwärme**

Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fernwärme aus Müll werden bundesweit im Mittel 189 g/kWh und für Bremerhaven 256 g/kWh angegeben. Dies erscheint realistischer als die völlige Allokation der Emissionen auf andere Bilanzteile und eine Bilanzierung der Emissionen aus der Verbrennung zu 0,0 g/kWh. Für das Referenzsystem zur Wärmebereitstellung aus Gas werden 285 g/kWh bilanziert.

#### **4.1.2 Strom**

Für den Strommix „Naturwatt“ liegt ein Zertifikat nur für die Quelle vor, nicht jedoch direkt für die CO<sub>2</sub> Emissionen mit oder ohne vorgelagerte Bereitstellungsketten. Der Strom (Ökostrom) kommt für das Klimahaus zu 10% aus einer Windenergieanlage bei Cuxhaven, Deutschland (Enercon E-112) und zu 90% aus der Wasserkraftanlage in Fossdal, Norwegen (Skjerka). Für diesen Strommix lassen sich – unter Berücksichtigung aller Vorketten – CO<sub>2</sub>-Emissionen von 11,2 g/kWh ermitteln.

Zum Vergleich sind auch Angaben zu Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus anderen Quellen dargestellt. In einer kombinierten Produktion von Strom und Wärme in einem Müllheizkraftwerk (Müll-HKW) kann gem. UBA für Strom 405 g/kWh angenommen werden. Für den Strom in Bremerhaven wird nach der IZES-Studie 667 g/kWh angegeben, was relativ gut mit den Angaben zum Bundesmix übereinstimmt (siehe Tabelle 6).

#### **4.1.3 Gas**

Gas wird im Klimahaus ausschließlich zu Kochzwecken im Gastronomiebereich benutzt. Eingesetzt wird Naturwatt Biogas aus der Biogasanlage in Werlte, in der hauptsächlich Schweine- und Rindergülle sowie tierische und pflanzliche Fette verarbeitet werden. GEMIS gibt hierfür äquivalente (inkl. Vorketten) spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von 4.3 g/kWh an.

#### **4.1.4 Wasser / Abwasser**

In die Wasserbedarfsbilanz des Klimahauses gingen die jährlichen Frischwasserbedarfe für die Aquarien (ca. 1200 m<sup>3</sup>/a), die Küche (ca. 550 m<sup>3</sup>/a) sowie ein Ansatz für sonstige Wasserbedarfe (v.a. Toiletten Besucher) (2200 m<sup>3</sup>/a) ein. Die gesamten äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen für Wasser / Abwasser werden in GEMIS zu etwa 310 g/m<sup>3</sup> angegeben.

Endenergieträger / Medium	spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen	Quelle
Fernwärme SWB	0.000 g/kWh	Zertifikat der Stadwerke Bremerhaven vom 4.10.2004
Fernwärme UBA (aus Müll-HKW)	188.6 g/kWh	Studie Bestimmung spezifischer Treibhausgas- Emissionsfaktoren für Fernwärme, 8/08, ISSN 1862-4359
Fernwärme IZES (Bremen)	256.0 g/kWh	Studie Basisdaten zur CO <sub>2</sub> -Minderung im Land Bremen, 14.8.2008
Referenz Wärme (Erdgas)	284.7 g/kWh	Referenz Wärme aus Gasheizwerk, Studie Bestimmung spezifischer Treibhausgas- Emissionsfaktoren für Fernwärme, 8/08, ISSN 1862-4359
Strom SWB	560.0 g/kWh	Angaben Stadwerke Bremerhaven 4.10.2004
Strom UBA (aus Müll-HKW)	405.0 g/kWh	Studie Bestimmung spezifischer Treibhausgas- Emissionsfaktoren für Fernwärme, 8/08, ISSN 1862-4359
Strom IZES (Bremen)	667.0 g/kWh	Studie Basisdaten zur CO <sub>2</sub> -Minderung im Land Bremen, 14.8.2008
Strom NaturWatt	11.2 g/kWh	Angaben zum Strommix "NaturWatt" von EWE NaturWatt GmbH, 20.9.2008 10% Windkraft aus DE, 90% Wasserkraft aus NO, Emissionsfaktoren aus GEMIS 4.42 für 2005
Referenz Strom (Bundesmix)	644.9 g/kWh	Referenz Bundesmix, Studie Bestimmung spezifischer Treibhausgas- Emissionsfaktoren für Fernwärme, 8/08, ISSN 1862-4359
Biogas NaturWatt	4.3 g/kWh	Biogasanlage Werte, Emissionsfaktoren nach GEMIS 4.42 für 2005
Wasser	310 g/m <sup>3</sup>	Gesamtwert für Wasser / Abwasser nach GEMIS 4.42 für 2005

*Tabelle 6: Übersicht spezifische Emissionen nach Endenergieträger und Bewertungsansatz*

## 4.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Betrieb des Klimahauses

Die betrieblichen CO<sub>2</sub> Emissionen für das Klimahaus wurden auf Basis unterschiedlicher Ansätze für die Bewertung spezifischen CO<sub>2</sub> Emissionen bezüglich des Standes Konzeptentwurf November 2005 verglichen.

### **Szenario I: Das Szenario entspricht der Bewertung vom November 2005.**

Der Fernwärme werden keine Emissionen zugeschrieben. Es werden nur Emissionen aus Strom bilanziert. Da Ökostrom verwendet wird, sind die spezifischen wie absoluten Emissionen gering. Für die Gebäudeklimatisierung werden nur 7 t/a bilanziert. Der Beitrag für den der Nutzung (Ausstellung, Licht, etc.) zugeordneten Strom ist 72 t/a.

Bei 600'000 jährlichen Besuchern entfallen also im Mittel 0,12 kg auf einen Besucher.

### **Szenario II: Dieses Szenario wird aktuell für das Klimahaus angesetzt (siehe Tab. 1).**

Nach Ansatz der für Bremerhaven relevanten Faktoren (IZES-Studie) ergeben sich mit der Nutzung der Fernwärme (FW) für Heizen und Kälte Emissionen von 165 t/a, für die gesamte Gebäudeklimatisierung in Summe 173 t/a.

Die gesamten Emissionen betragen 237 t/a, auf einen Besucher entfallen 0,40 kg.

### **Szenario III: Das Szenario entspricht der Bewertung des UBA.**

Bewertet man zum Vergleich die kombinierte Produktion von Strom und Fernwärme in einem Müllheizkraftwerk mit den Faktoren des Umweltbundesamtes, so ergeben sich 391 t/a für die Klimatisierung und 2643 t/a für den der Nutzung zugeordneten Strom. Diese deutliche Steigerung beruht auf den höheren spezifischen Emissionen für Strom.

Auf einen Besucher müssten insgesamt 4,57 kg bilanziert werden.

### **Szenario IV: Referenz.**

Bewertet man zum Vergleich die Produktion von Strom nach dem Bundesmix und Wärme mit einem Gasheizwerk, so ergeben sich 613 t/a für die Klimatisierung und 4199 t/a für den Nutzerstrom.

Auf einen Besucher müssten insgesamt 7,16 kg bilanziert werden.

Die Betrachtung zeigt bezüglich der **Wärmeversorgung**, dass nach heutigem Kenntnisstand die Versorgung des Klimahauses mit Fernwärme aus Müll-KWK nicht als CO<sub>2</sub> neutral betrachtet werden sollte. Die Emissionen sind im Vergleich zum Referenzsystem Erdgas (nur) ca. 10% geringer.

Hinsichtlich der **Stromversorgung** zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Versorgung mit dem gewählten Ökostrom-Produkt gegenüber dem Bundesmix um ca. 98% reduziert werden.

In der Summe werden nach heutigem Kenntnisstand durch die gewählte Energieversorgung die Emissionen auf ca. 5,6% der Referenzsysteme reduziert. Auch wenn die Emissionen demnach nicht auf Null reduziert werden, so stellt diese Zahl, der seriös und unabhängig ermittelte spezifische Emissionsfaktoren (Stand 2005) zugrunde liegen, ein Ergebnis dar, mit dem das Klimahaus seinem hohen Anspruch an die eigenen Maßstäbe sicher gerecht wird.

## **4.3 Persönliche Bilanz**

### **4.3.1 Wie viel CO<sub>2</sub> Emissionen sind mit einem Besuch des Klimahauses pro Besucher verbunden?**

Neben den betrieblichen Emissionen wurden außerdem die Bereiche Anreise und Ernährung genauer bilanziert um die mit dem Besuch des Klimahauses verbunden Gesamtemissionen zu bewerten. Eine umfassende Betrachtung findet sich in [11], Seiten 12 bis 18. Als Beispiel ist hier der Bereich der Anreise wiedergegeben:

Nach Angaben des Betreibers werden 600.000 Besucher p.a. prognostiziert. Abbildung 40 zeigt das prognostizierte Haupteinzugsgebiet um Bremerhaven. Das Einzugsgebiet ist in 7 Zonen mit Fahrzeiten von 15 bis 135 min (einfach) unterteilt (Schnitt 60 km/h).

Die aus den Zonen A bis G erwarteten Besucherzahlen sind in Abbildung 41 dargestellt.

Für die Anreise wurde angenommen, dass die Besucher zu 70% mit dem PKW anreisen, 25% mit dem Bus (Fernverkehr) und 5% mit dem öffentlichen „Nahverkehr“.

Für den PKW wurde ein mittlerer Verbrauch von 9 l pro 100 km angenommen. Dies entspricht CO<sub>2</sub>-Emissionen von 202 g/km<sup>5</sup>. Die PKW sind im Mittel mit 3 Personen besetzt.

Für die Anreise mit dem Bus wurden Angaben zum Personen-Fernverkehr und einer mittleren Auslastung von 50% angenommen. Dies entspricht CO<sub>2</sub>-Emissionen von 31 g/km<sup>6</sup>.

Für den Öffentlichen „Nahverkehr“ wurde eine Auslastung von 21% angenommen. Bis 30 km Entfernung (Zone A und B) wurden Angaben zu Personennahverkehr aus Zug und Bus gemittelt (78 g/km). Für Zonen C bis G wurden entsprechende Angaben zum Personen-Fernverkehr gemittelt (39 g/km)<sup>5</sup>.

Die Angaben wurden mit den jeweiligen Prozentsätzen gewichtet und für die verschiedenen Entfernungszonen ermittelt (siehe Tabelle).

Der individuelle Beitrag der Anreise variiert naturgemäß sehr stark. In der Tabelle können die individuellen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Verkehrsmittel und Zone (Fahrstrecke bzw. Fahrzeit) abgelesen werden.

In Abbildung 42 sind die ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Person für die einzelnen Entfernungszonen dargestellt. Die Emissionen liegen im Bereich von 1,8 kg (Zone A) bis 15,4 kg (Zone G).

Berücksichtigt man die spezifischen Besucherzahlen aus den einzelnen Zonen, so ergibt sich ein Mittelwert pro Besuch und Besucher von 5,1 kg.

Insgesamt sind mit der Anreise aller Besucher CO<sub>2</sub> Emissionen von 2584 t pro Jahr verbunden. Das ist ca. 10-mal mehr als die mit dem Betrieb verbundenen Emissionen.

---

<sup>5</sup> Angaben des Umweltbundesamtes und des ADAC

<sup>6</sup> Angaben: Deutsche Bundesbahn AG, Mobil 07/07

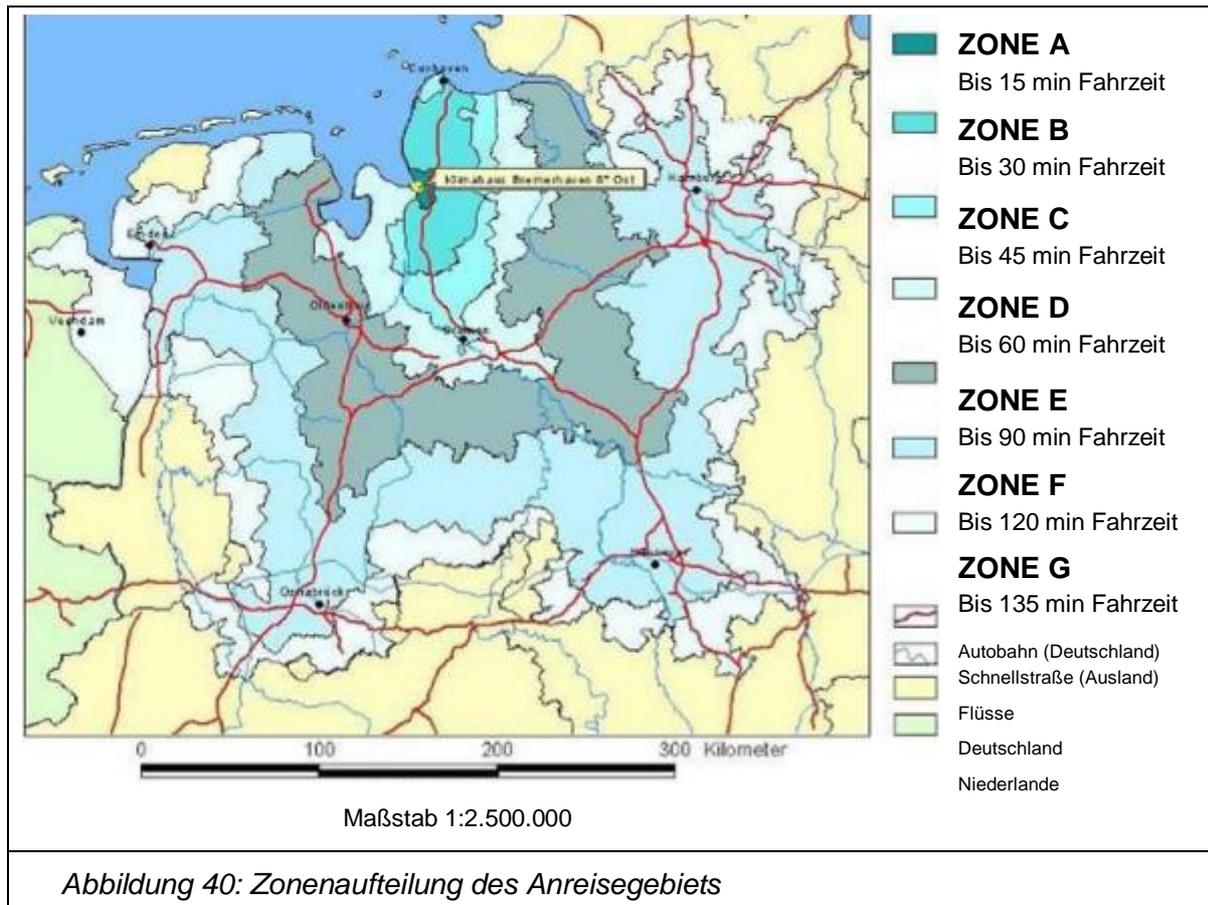


Abbildung 40: Zonenaufteilung des Anreisegebiets

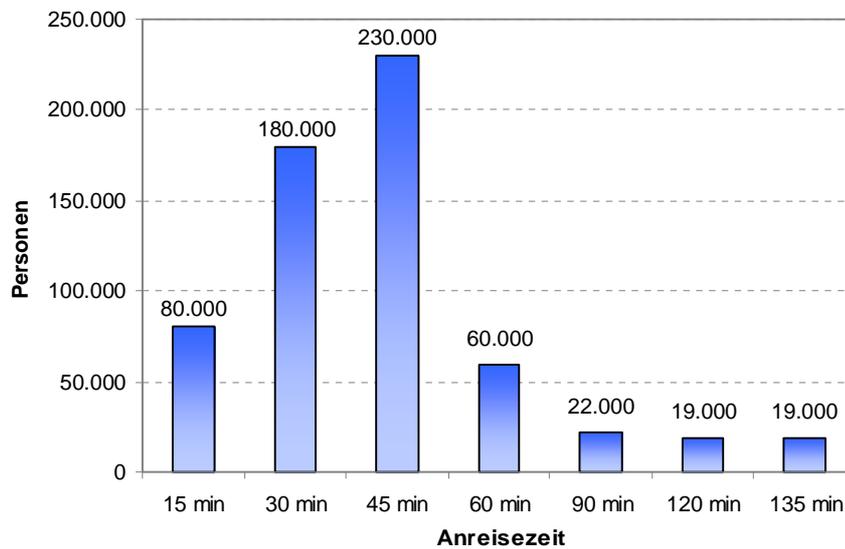


Abbildung 41: Besucherzahlen aus den Zonen A (15 min) bis G (135 min)

Schnitt: 60 km/h

Zone	Besucherzahl Peronen	Fahrzeit		Kilometer hin & zurück	Pers pro PKW	70 % PKW		
		einfach	hin & zurück			kg CO <sub>2</sub> km	kg CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub> Pers
A	80.000	15 min	30 min	30 km	3	0,202	113.282	2,02
B	180.000	30 min	60 min	60 km	3	0,202	509.771	4,05
C	230.000	45 min	90 min	90 km	3	0,202	977.061	6,07
D	60.000	60 min	120 min	120 km	3	0,202	339.847	8,09
E	22.000	90 min	180 min	180 km	3	0,202	186.916	12,14
F	19.000	120 min	240 min	240 km	3	0,202	215.237	16,18
G	19.000	135 min	270 min	270 km	3	0,202	242.141	18,21
	<b>Total: 610.000</b>						<b>Total: 2.584.255</b>	<b>Mittel gew: 6,05</b>

Auslastung 50 %

Auslastung 21 %

Zone	25 % Bus			5 % ÖPNV			Pro Zone	
	kg CO <sub>2</sub> Pers km	kg CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub> Pers	kg CO <sub>2</sub> Pers km	kg CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub> Pers	kg CO <sub>2</sub>	kg CO <sub>2</sub> Pers
A	0,031	18.600	0,93	0,078	9.300	2,33	141.182	1,76
B	0,031	83.700	1,86	0,078	41.850	4,65	635.321	3,53
C	0,031	160.425	2,79	0,039	40.365	3,51	1.177.851	5,12
D	0,031	55.800	3,72	0,039	14.040	4,68	409.687	6,83
E	0,031	30.690	5,58	0,039	7.722	7,02	225.328	10,24
F	0,031	35.340	7,44	0,039	8.892	9,36	259.469	13,66
G	0,031	39.758	8,37	0,039	10.004	10,53	291.902	15,36
		<b>Total: 424.313</b>	<b>Mittel gew: 2,78</b>		<b>Total: 132.173</b>	<b>Mittel gew: 4,33</b>	<b>Total: 3.140.740</b>	<b>Mittel gew: 5,15</b>

Tabelle 7: CO<sub>2</sub> Emission durch Anreise der Besucher

Pro Besucher werden für den Betrieb 0,390 kg ermittelt, für das Mittagessen mit Fleischkonsum 1,56 kg und für die Anreise im Mittel 5,1 kg. Einem Klimahausbesuch können demzufolge CO<sub>2</sub>-Emissionen von im Mittel ca. 7 kg zu geordnet werden (siehe Abbildung 43).

Bei Einnahme eines vegetarischen Essens werden ca. 480 g weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert. Die „Einsparungen“ liegen in der Größenordnung der mit dem Betrieb verbundenen Emissionen. Für vegetarische Besucher fallen 6,7 kg Emissionen an.

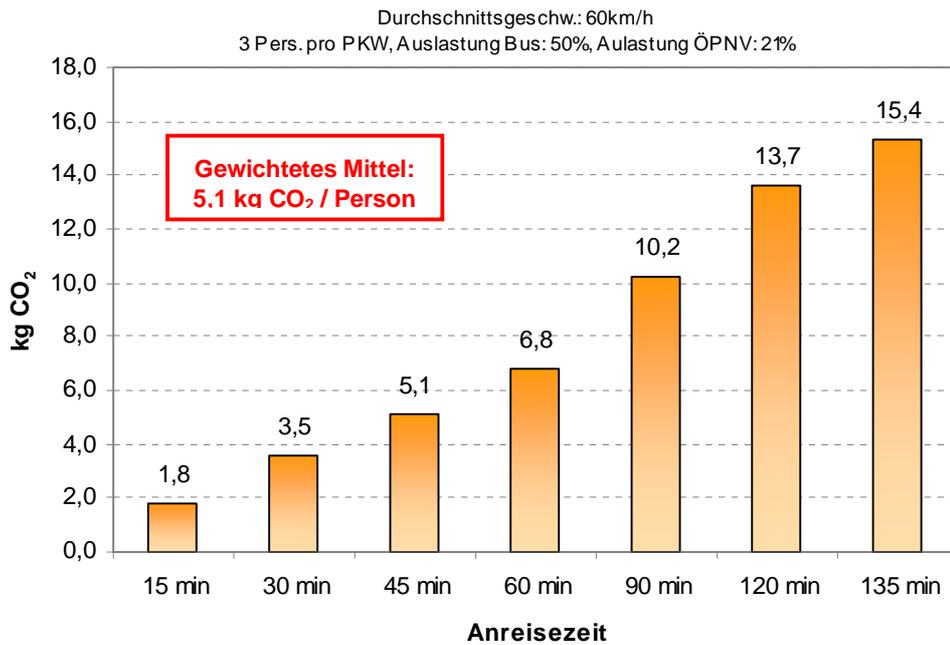


Abbildung 42: CO<sub>2</sub> Emission für An- und Abreise je Entfernungzone pro Person in kg

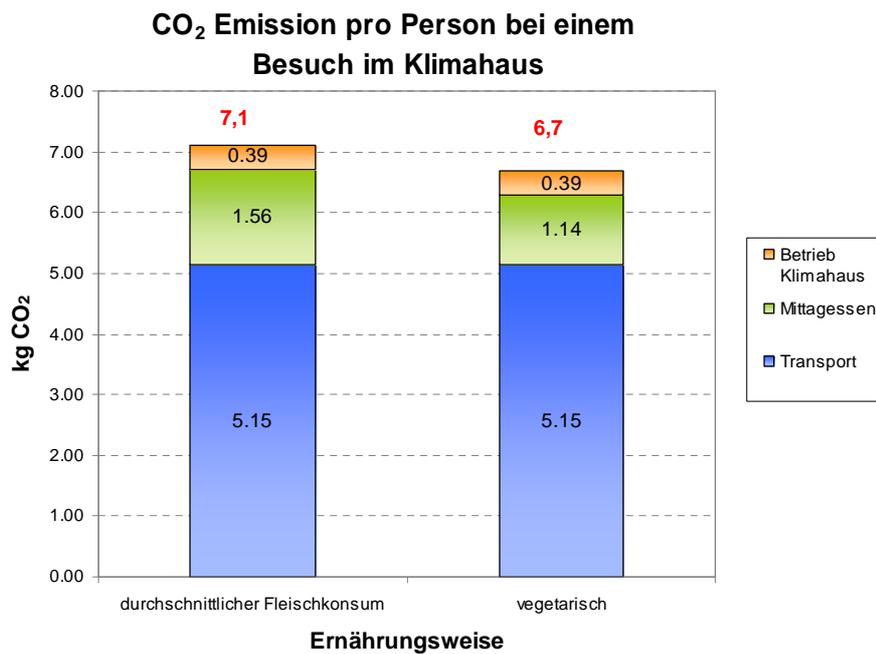


Abbildung 43: CO<sub>2</sub> Emissionen pro Person bei einem Besuch im Klimahaus

### 4.3.2 Was können Besucher tun um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden?

Verschiedene Möglichkeiten diese Emissionen durch persönliche Maßnahmen zu kompensieren wurden beispielhaft diskutiert. Die Maßnahmen lassen sich auch wieder den Bereichen: Reduktion von Emissionen im privat Haushalt, Reduktion von Emissionen für Transport sowie im Bereich der Ernährung zuordnen[11]. Untersucht wurden:

- Ersatz von Leuchtmittel durch Energiesparlampen
- Sonne statt Wäschetrockner
- Vermeiden von Stand-by-Verbräuchen
- Nutzung von Fahrrad statt PKW oder Bus
- Sparsame Fahrweise
- Flugzeug oder Zug
- Bäume pflanzen
- Verzicht auf Obst/Gemüse aus Übersee

Beispielhaft ist hier ein Vorschlag zitiert, der für die Umsetzung von Kindern wie Erwachsenen geeignet erscheint (siehe Tabelle ).

Kinder könnten z.B. durch die Nutzung des Fahrrads für einen Schulweg von 5 km Länge (einfache Strecke) innerhalb von ca. 10 Tagen die Emissionen des Klimahausbesuches kompensieren.

Autofahrer könnten bei Nutzung von Bus statt PKW für den Arbeitsweg (5 km einfache Strecke) innerhalb von ca. 6 Tagen, bei Nutzung des Fahrrads innerhalb von ca. 4 Tagen die Emissionen des Klimahausbesuches kompensieren.

Übliche Transportweise zur Arbeit/Schule	Distanz in km hin & zurück	kg CO <sub>2</sub> km	Emission kg CO <sub>2</sub> Fahrt	Anzahl der Fahrten ohne Auto zur Kompensation des Klimahausbesuchs
Auto	10	0.202	2.02	0
Bus	10	0.078	0.78	6
Fahrrad	10	0.000	0.00	4

*Tabelle 8: Vergleich der Emissionen für unterschiedliche Verkehrsmittel*

## 5 Dokumentation und Veröffentlichung

### Vorträge

- Seminar: Zentrum für Angewandte Energieforschung, ZAE Bayern, München: Vortrag: „Was macht eigentlich ein Klimaingenieur“, W. Keßling, 24.2.2005
- Werkstattbericht „Integrale Planung innovativer Klima- und Energieversorgungskonzepte für das Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost“, Bremerhaven, W. Keßling, 18.05.2006
- Abendvortrag: „Innovative Energiekonzepte“, Donau Universität Krems, W. Keßling, 15.3.2007
- Vortragsreihe Clima Design, Vortrag: „Nachhaltigkeit – Physik – Architektur“, Technische Universität München, W. Keßling, 8.1.2008
- RENEXPO, Vortrag: „Beyond Greenwash: Innovative Klimakonzepte in der Umsetzung“, Augsburg, W. Keßling, 9.10.2008
- Bremer Impulse, Veranstaltungsreihe der Bremer Energiekonsens GmbH, Vortrag: „Integrale Planung innovativer Klima- und Energieversorgungskonzepte“, Ch. Oberdorf, 05.11.2008
- Bremer Architekten- und Ingenieurkammer, Vortrag: „Integrale Planung innovativer Klima- und Energieversorgungskonzepte“, Ch. Oberdorf, 05.11.2008
- Bremer Impulse, Veranstaltungsreihe der Bremer Energiekonsens GmbH, Vortrag: „Integrale Planung innovativer Klima- und Energieversorgungskonzepte“, Ch. Oberdorf, 28.05.2009
- Industrieauseminar 2009, Beyond Sustainability Vortrag und Buchveröffentlichung: „Integrale Planung innovativer Klima- und Energieversorgungskonzepte“, W. Keßling, 15.05.2009

### Presseberichte

- „Klimahaus technisch ein Vorbild“, Nordsee-Zeitung vom 12.07.2004
- „Klimahaus will Maßstäbe setzen“, Nordsee-Zeitung vom 07.02.2005
- „Klima fürs Klimahaus“, Immobilien Zeitung vom 24.02.2005
- „Besucher produzieren Wärme“, Weser Kurier vom 17.11.2005
- "Umwelt liefert Energie für Klimazonen" / „Kühles Klima ganzjährig aus der Erde", Nordsee-Zeitung vom 17.11.2005
- „Vom Eismeer in die Wüste“, VDI Nachrichten vom 01.09.2006
- „Klimahaus Bremerhaven - Energetische Herausforderung hinter Glas“, Facility Management vom 01.03.2007
- „Mit ganzheitlichen Energiekonzepten auf Erfolgskurs“, open PR vom 08.03.2007
- „Klimahaus schont Umwelt schon beim Bau“, Oldenburgerische Volkszeitung,

- Münsterländische Tageszeitung vom 08.05.2007
- „Die Klima-Schalung“, bi Magazin vom 01.09.2007
- „Technik& Wissen 2008“, WirtschaftsWoche vom 21.12.2007
- „Klimahaus bietet Gluthitze wie Eiskälte“, Delmenhorster Kreisblatt vom 06.03.2008
- „Gluthitze und Eiskälte liegen im Klimahaus dicht zusammen“, Weser Kurier, Bremer Nachrichten vom 06.03.2008
- „Fakten zum Klimahaus / Zu Fuß einmal um die Erdkugel“, Stader Tageblatt vom 28.04.2008
- „Wie klimafreundlich ist das Klimahaus“, Geo Online vom 29.04.2008
- „Ideale Maße“, Photovoltaik vom 01.04.2009
- „Im Norden wie im Süden“, Deutsche Bauzeitung vom 01.04.2009

## **Vermittlung durch Exponate in der Ausstellung**

### ***CO2-Terminals***

Im gesamten Klimahaus® sind so genannte CO2-Terminals aufgestellt, an denen die Besucher ihr persönliches KlimaKonto anlegen können. Dazu müssen Fragen zum persönlichen Verhalten in den Bereichen „Reisen“, „Mobilität“, „Ernährung“, „Meine Wohnung“, etc. beantwortet werden. Mit Hilfe der Antworten wird ermittelt, wie viele Tonnen an Treibhausgasen, die für den von Menschen verursachten Klimawandel verantwortlich sind, in einem Jahr durch die persönlichen Aktivitäten entstehen. In der Auswertung erfährt der Besucher, in welchen Bereichen seine CO2-Bilanz besser ist, als der bundesdeutsche Durchschnitt und auf welchen Gebieten er sich verbessern sollte.

Tragen mein wohnliches Umfeld oder meine Reisegewohnheiten hauptsächlich zu meinem „Klimarucksack“ bei? Oder sind mein Kaufverhalten und meine Ernährungsgewohnheiten ausschlaggebend?

Der Besucher wird mit seinem Ergebnis nicht allein gelassen, sondern bekommt Tipps an die Hand, wie er sich im Alltag mit wenig Aufwand Klima schonender verhalten kann. In acht verschiedenen „Spielräumen“ im Ausstellungsbereich CHANCEN können die Besucher spielerisch erfahren, dass Klimaschutz gar nicht so schwer ist.

### ***Exponat „Energiekonzept“***

Im Foyer des Klimahauses wird das Energiekonzept anhand eines Exponats den Besuchern vermittelt und erklärt. Eine Wandinstallation zeigt einen Querschnitt des Klimahauses, in dem die verschiedenen Module des Energiekonzeptes dargestellt und erläutert werden. Der Besucher hat somit die Möglichkeit, sich über das umgesetzte Energiekonzept direkt vor Ort zu informieren.

Damit wird das Energiekonzept auf besondere Art und Weise präsentiert und jährlich 600.000 Besuchern nahe gebracht.

## 6 Fazit

Die Planung des Klimahaus Bremerhaven 8 °Ost stellte für alle Planungsbeteiligten eine besondere Aufgabe dar. Dies lag vor allem an der außergewöhnlich komplexen baulichen Struktur des Gebäudes sowie den vielfältigen und ungewöhnlichen, teilweise extremen Nutzungsanforderungen – mithin für das Klimaengineering eine besonders spannende Herausforderung. Es zeigte sich, dass gerade in einem komplexen Bauvorhaben ein übergreifender, integraler Planungsansatz nötig ist, um – unabhängig von einzelnen Gewerken und Disziplinen – die wesentlichen Fragestellungen zu erkennen, Prioritäten zu ordnen und gewerkeübergreifend ein Gesamtkonzept zu entwickeln, dessen Umsetzung zu begleiten und so Synergien und Einsparungen nutzbar zu machen. Trotz einiger Schwierigkeiten und Umwege in einem langwierigen Planungsprozesses mit wechselnden Planungspartnern konnte im Hinblick auf das Klima- und Energiekonzept vieles erreicht werden. Hilfreich und wichtig war dabei die durchgängige und uneingeschränkte Unterstützung dieses Prozesses durch Betreiber und Bauherr.

Ausgangspunkt war die kritische Auseinandersetzung mit der Nutzung und den Nutzungsanforderungen sowie eine ausführliche Analyse des Energiebedarfs und seiner Struktur. Ein bewusster Umgang mit internen Wärmelasten bei allen Planungspartnern (insbesondere bei der Ausstellungsinszenierung) führte zu einer signifikanten Reduktion der Ansätze und eröffnete so den Weg für natürliche und natürlich unterstützte Klimakonzepte. Mehrfachnutzung von Bauteilen und die gewerkeübergreifende Verknüpfung einzelner Bestandteile des Gebäudes waren weitere Planungsbestandteile. Auf dieser Basis konnte ein Klima- und Energieversorgungskonzept entwickelt werden, das es beispielsweise ermöglicht, wesentliche Teile des Gebäudes vollständig ohne den Einsatz mechanischer Kälteerzeugung zu klimatisieren oder Fernwärme – zumindest gezielt in Einzelbereichen – zur Kälteerzeugung einzusetzen und so wertvolle Primärenergie einzusparen.

Die für die planerische und tatsächliche Umsetzung nötige enge konzeptionelle Abstimmung mit unterschiedlichen beteiligten Planungsbeteiligten und Gewerken – von der Ausstellungsplanung über Rohbau und Haustechnik bis hin zur Fassade – ist dabei essentiell für den Erfolg des integralen Planungsprozesses. Dies gelang in vielen Bereichen gut, wenngleich festzustellen bleibt, dass aufgrund des langwierigen und verzweigten Planungsablaufs das Potential einer integralen Planung womöglich nicht an allen Stellen maximal ausgeschöpft werden konnte. An einigen Stellen erwies sich die bauliche Umsetzung einzelner Konzeptelemente als aufwändiger als ursprünglich vorgesehen. Es zeigt sich auch, dass neben der Entwicklung übergreifender Konzepte die effiziente Planung und Umsetzung der „standardmäßigen“ Haustechniksysteme nicht aus den Augen verloren werden sollte.

Gerade deshalb halten es die Autoren für empfehlenswert, integrale Planung als Planungskonzept und –bestandteil in derartigen Bauprojekten grundsätzlich anzuwenden und deren Verankerung im Planungsablauf weiter zu optimieren. Der planerische Mehraufwand, der zweifelsohne entsteht, im standardmäßigen Planungsumfang jedoch üblicherweise nicht abgedeckt ist, ist im Gesamtergebnis positiv ablesbar.

Im konkreten Fall des Klimahauses erscheint es als nächster Schritt empfehlenswert, zur Ermittlung des tatsächlichen Energieverbrauchs sowie als Grundlage für die Betriebs- und energetische Optimierung ein Monitoring-Programm – oder zumindest eine intensiviertere und quantitative Betriebsüberwachung der wichtigsten Anlagenkomponenten und Energieströme – anzusetzen.

## Berichtverzeichnis, Hauptberichte

- [1] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Konzeptentwurf Heizen / Kühlen / Klimatisieren, Schätzung Energiebedarf, Transsolar Energietechnik GmbH, 15.09.2003
- [2] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Konzepte zur natürlichen Klimatisierung, Ermittlung Energiebedarf Heizen / Kühlen / Klimatisieren, Transsolar Energietechnik GmbH, 04.10.2004
- [3] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Energieversorgungskonzepte zur Gebäudeklimatisierung, Transsolar Energietechnik GmbH, 09.11.2004
- [4] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Tageslichtsimulation Zentrale Erschließung, Foyer, Restaurant, Transsolar Energietechnik GmbH, 07.12.2004
- [5] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Energieversorgungsszenarien auf Basis einer Fernwärme- / Fernkälteversorgung, Transsolar Energietechnik GmbH, 19.05.2005
- [6] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Gebäudeintegrierte Photovoltaik – Nutzung, Integration, Kostenbetrachtung, Transsolar Energietechnik GmbH, 21.04.2005
- [7] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Anforderungskatalog, Anforderungen aus dem Klima- und Energiekonzept für die Ausführungsplanung, Teil: Rohbaurelevante Bereiche des Zuluft-Erdkanals, Transsolar Energietechnik GmbH, 20.04.2005
- [8] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Konzept zur Nutzung von Energiepfählen, Transsolar Energietechnik GmbH, 13.07.2005
- [9] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Anforderungen an die Regelungstechnik für die regenerative Klimatisierung, Transsolar Energietechnik GmbH, 05.04.2006
- [10] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, Anforderungen an die Außenfassade für die natürliche Lüftung, Transsolar Energietechnik GmbH, 05.04.2006
- [11] Klimahaus Bremerhaven 8 ° Ost, CO<sub>2</sub> Studie, Transsolar Energietechnik GmbH, 23.04.2009

# Anhang

## A: Schemata Energieversorgungskonzepte

### Versorgungskonzept 1: Strom und Fernwärme

Das Versorgungsszenario 1 (siehe Abbildung 44) stellt den einfachsten Fall der Energieversorgung dar: Die Wärmeversorgung wird direkt über den Energieträger Fernwärme bereitgestellt. Die Kälteerzeugung erfolgt mittels Kompressionskältemaschinen.

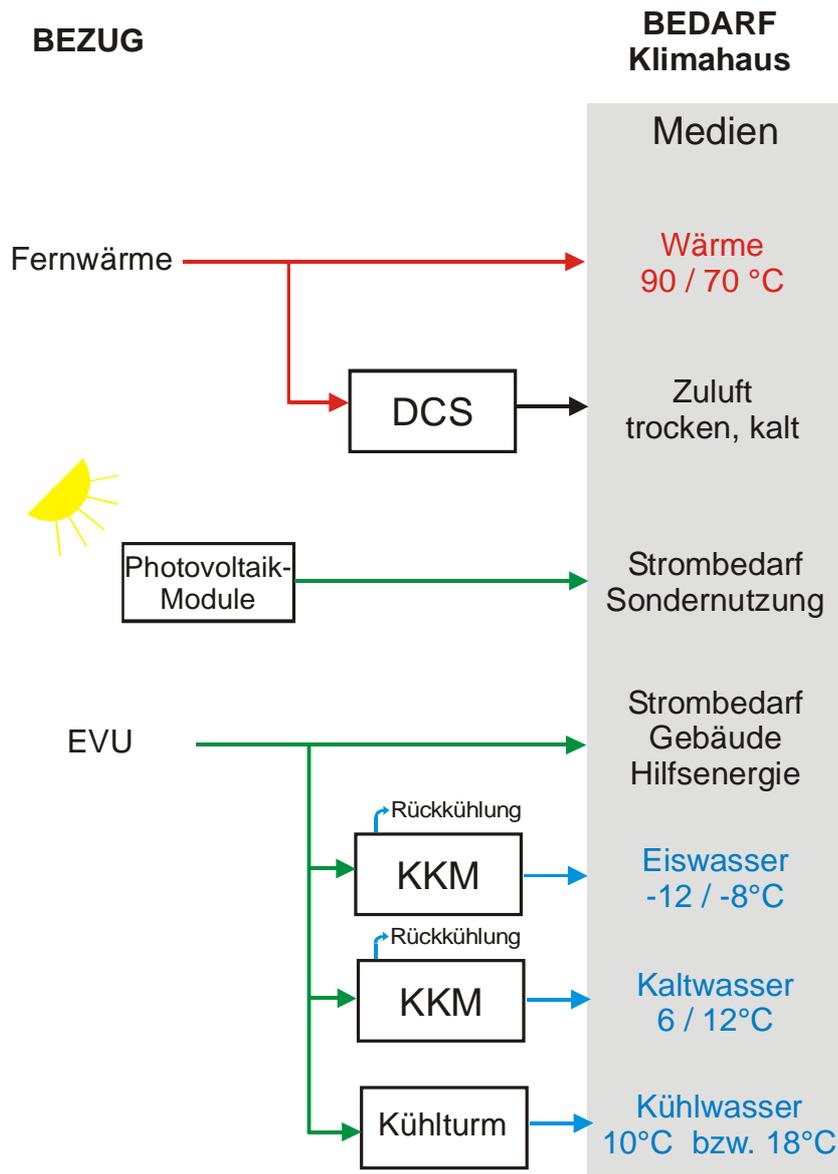


Abbildung 44: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 1 (konventionelles Referenzszenario)

## Versorgungskonzept 2: Strom und Fernkälte

Das Versorgungskonzept 2 (siehe Abbildung 45) entspricht dem Konzept 1, setzt jedoch zur Kaltwassererzeugung anstelle von Kompressionskälte eine Absorptionskältemaschine (AKM) ein.

Zu beachten ist bei diesem System, dass zum Betrieb der Absorptionskältemaschine im Sommer das Temperaturniveau der Fernwärme mindestens 90 °C betragen muss.

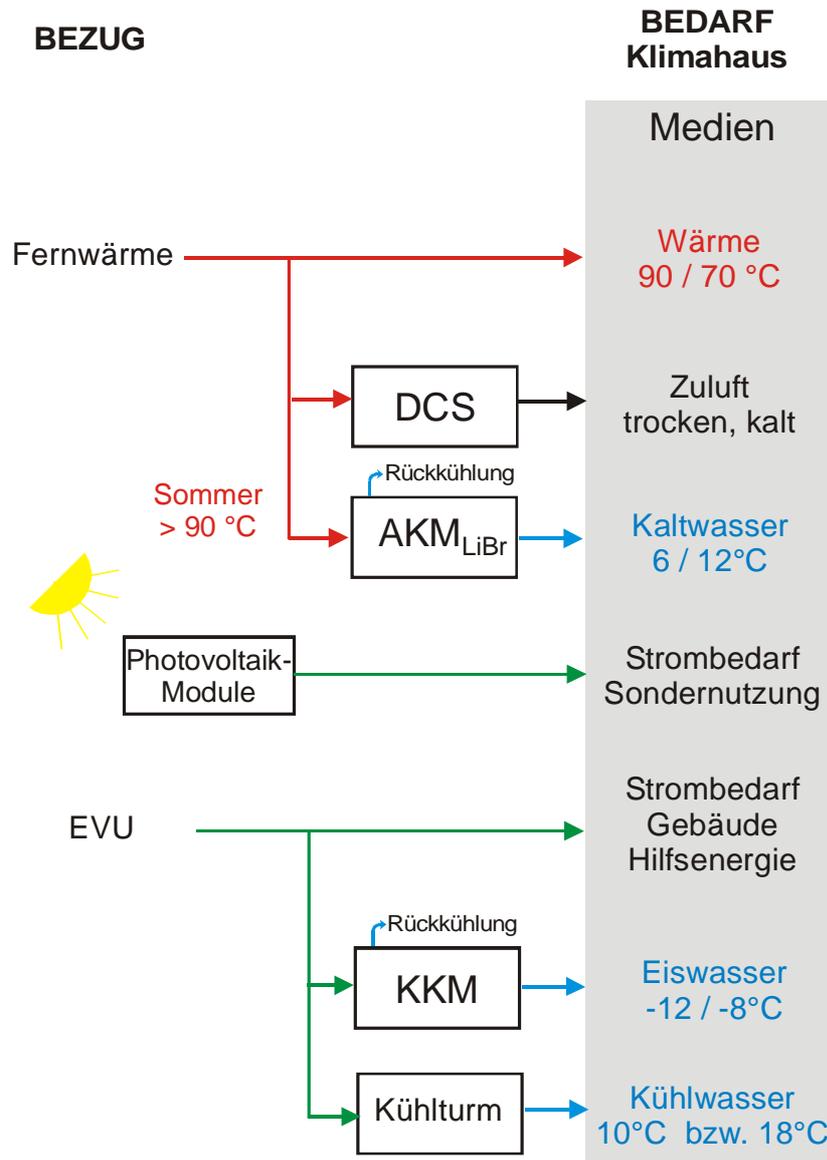


Abbildung 45: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 2

### Versorgungskonzept 3: Strom und Erdgas

Das Versorgungskonzept 2 (siehe Abbildung 46) entspricht dem Konzept 1, setzt jedoch zur Wärmeerzeugung anstelle von Fernwärme einen Gasbrenner (Erdgas) ein.

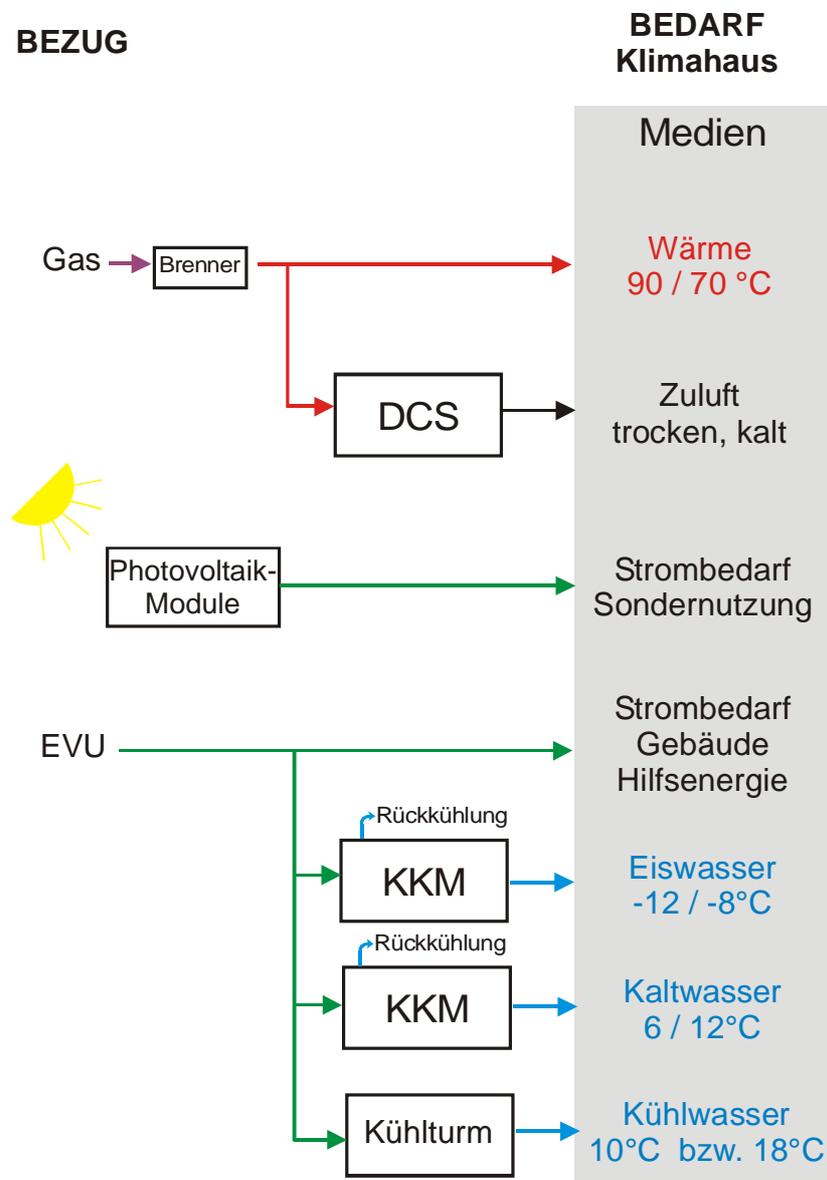


Abbildung 46: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 3

### Versorgungskonzept 4: Strom und Erdgas mit Absorptionskälte (Gas-direktgefeuert)

Das Versorgungskonzept 4 (siehe Abbildung 47) entspricht dem Konzept 2, setzt jedoch zur Wärmeerzeugung anstelle von Fernwärme einen Gasbrenner (Erdgas) ein. Der Kältebedarf für Kaltwasser (6/12°C) sowie Eiswasser (-12/-8 °C) wird mit Gas-direktgefeuerte Absorptionskältemaschinen bereitgestellt.

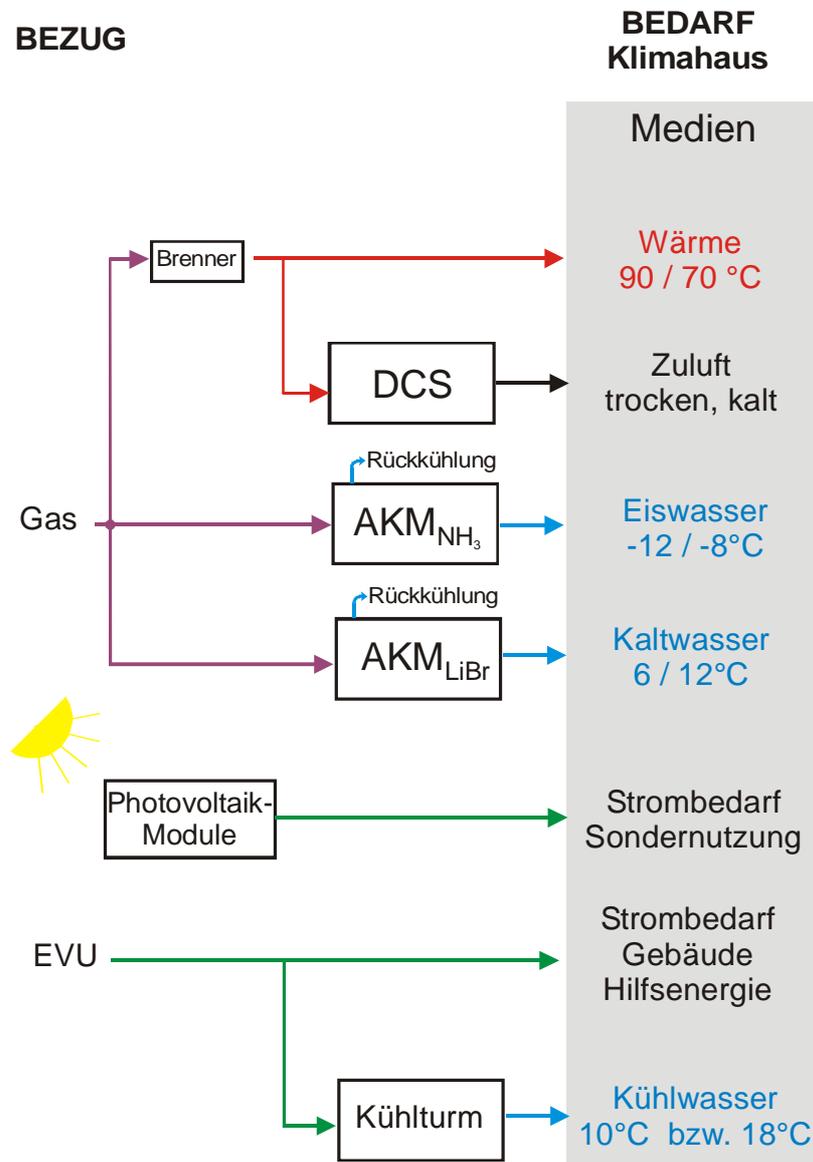


Abbildung 47: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 4

### Versorgungskonzept 5: BHKW und Absorptionskälte für Kaltwasser 6/12°C

Das Versorgungskonzept 5 (siehe Abbildung 48) sieht die Nutzung der Einrichtungen zur Notstromversorgung als ein gasbetriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) vor. Die Abwärme des BHKW wird in einer Absorptionskältemaschine zur Erzeugung von Kaltwasser oder zum Heizen im Gebäude ausgenutzt. Zusätzlich stehen für die Wärmeversorgung ein Gasbrenner und eine Kompressionskältemaschine zur Kaltwassererzeugung zur Verfügung, wenn das BHKW nicht in Betrieb ist. Die Eiswassererzeugung erfolgt ebenfalls über eine Kompressionskältemaschine. Der vom BHKW erzeugte Strom kann entweder zum Antrieb der Kompressionskältemaschinen und zur Eigenversorgung des Gebäudes genutzt werden.

Das BHKW ist mit 100 kW<sub>th</sub> ausgelegt. Weitere technische Daten siehe [3].

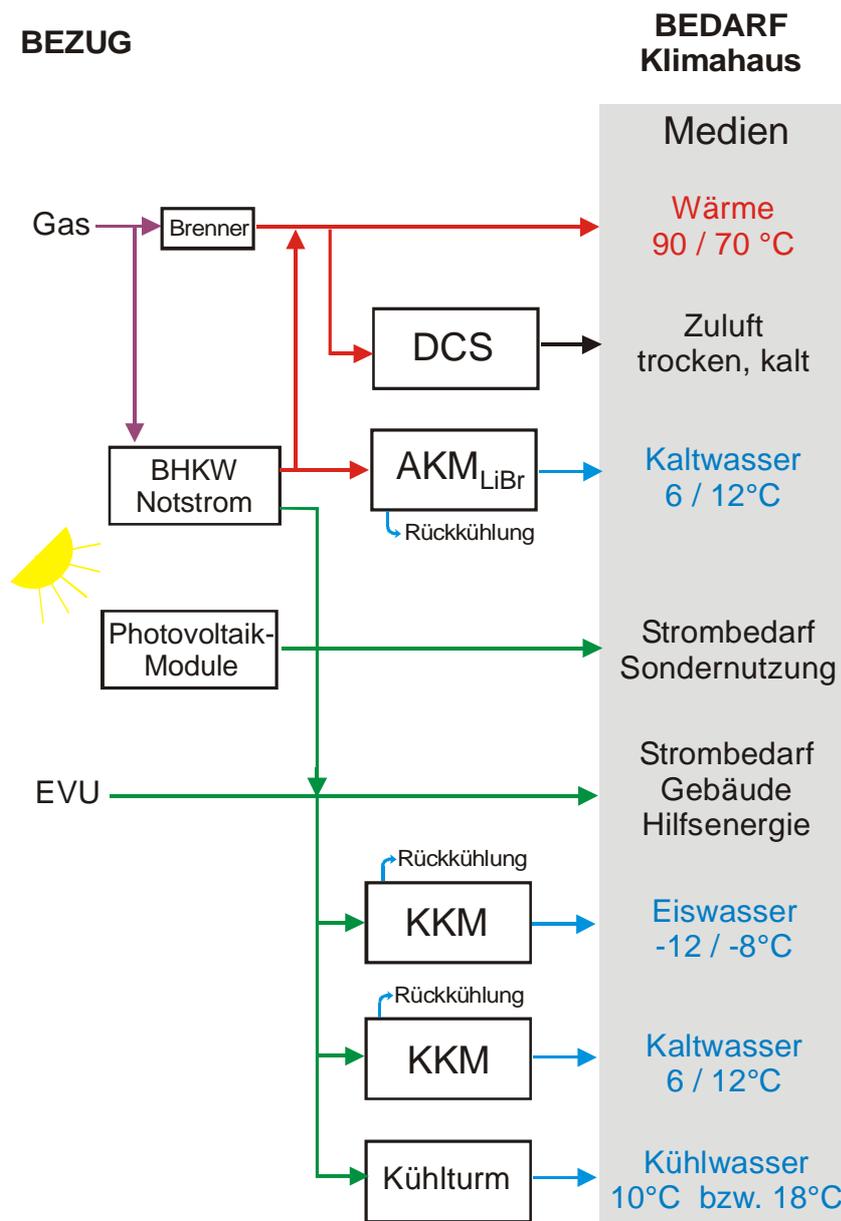


Abbildung 48: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 5

### Versorgungskonzept 6: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C

Das Versorgungskonzept 6 (siehe Abbildung 49) entspricht dem Szenario 5 mit dem Unterschied, dass die Abwärme des BHKW nun dazu verwendet wird, über eine Absorptionskältemaschine mit Ammoniak als Kältemittel Kälteleistung mit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes zur Eiswasserherstellung herzustellen. Zusätzlich stehen für die Wärmeversorgung ein Gasbrenner und eine Kompressionskältemaschine zur Eiswasserherzeugung zur Verfügung, wenn das BHKW nicht in Betrieb ist. Die Kaltwasserherzeugung erfolgt ebenfalls über eine Kompressionskältemaschine. Der vom BHKW erzeugte Strom kann entweder zum Antrieb der Kompressionskältemaschinen und zur Eigenversorgung des Gebäudes genutzt werden.

Das BHKW ist mit 250 kW<sub>th</sub> ausgelegt. Weitere technische Daten siehe [3]

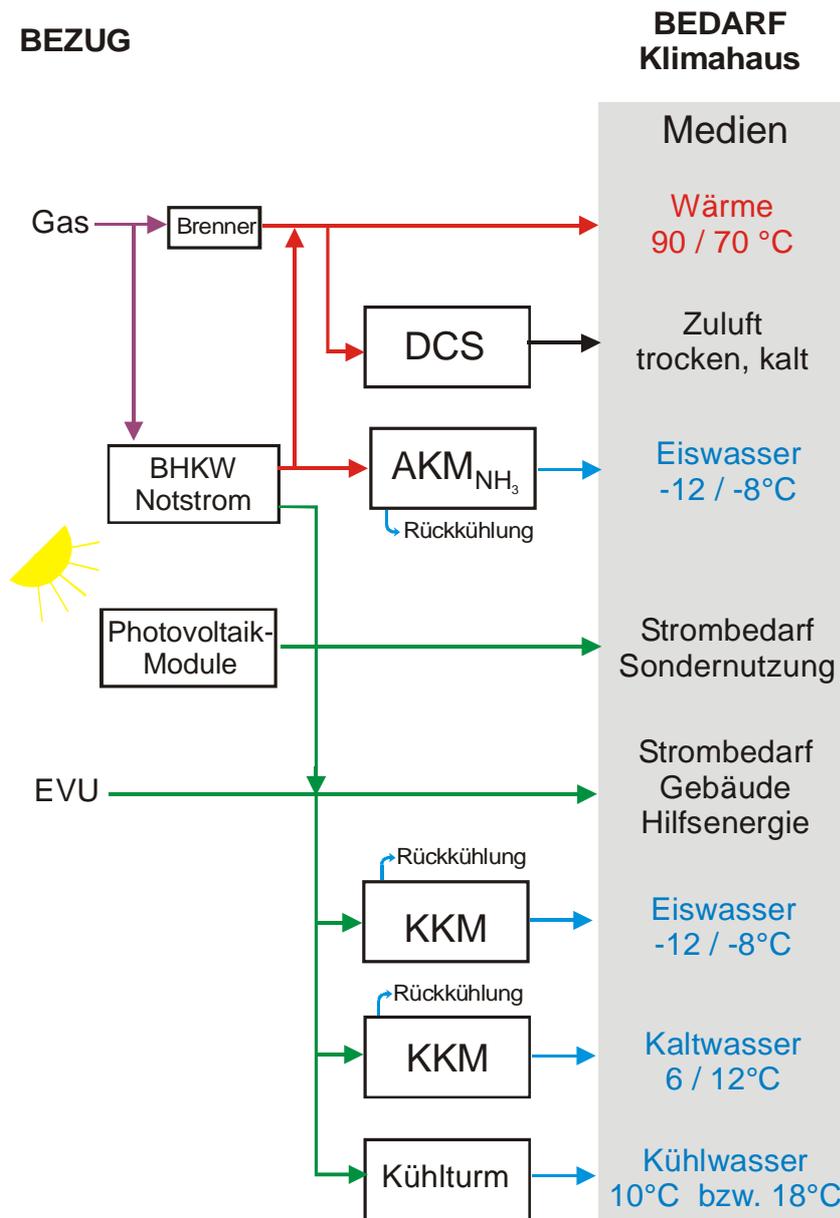


Abbildung 49: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6

### Versorgungskonzept 6A: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C

Im Versorgungskonzept 6A (siehe Abbildung 50) wird für die Eiskälteerzeugung ein zweistufiger Prozess aufgebaut. Die tiefen Temperaturen zur Eiserzeugung werden mit einer Kompressionskältemaschine erzeugt. Die Rückkühlung der Kompressionskältemaschine erfolgt über eine einstufige LiBr-Absorptionskältemaschine. Dadurch kann die mechanische Eiskälteerzeugung durch die geringe Temperaturspreizung (-12 °C auf ca. +6 °C) mit einem günstigen Wirkungsgrad (COP) betrieben werden und erfordert nur ca. 15 kW elektrische Antriebsleistung. Die Abwärme aus dem BHKW wird zum Antrieb der Absorptionskältemaschine genutzt, die ebenfalls auf günstigen Temperaturniveaus arbeitet. Der vom BHKW erzeugte Strom kann entweder zum Antrieb der Kompressionskältemaschinen und zur Eigenversorgung des Gebäudes genutzt werden. Das BHKW ist mit 140 kW<sub>th</sub> ausgelegt. Weitere technische Daten siehe [3].

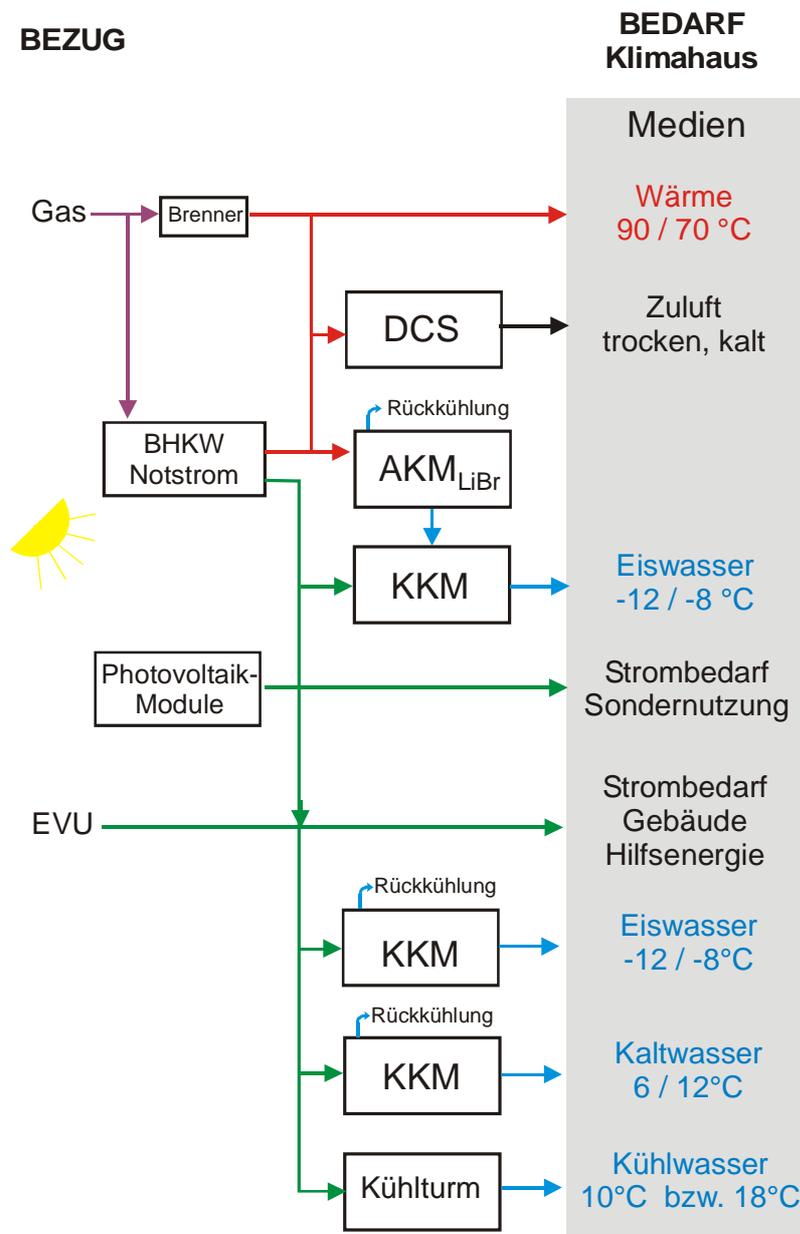


Abbildung 50: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6A

## Versorgungskonzept 6B: BHKW und Absorptionskälte für Eiswasser -12/-8°C

Das Versorgungskonzept 6B (siehe Abbildung 51) entspricht zunächst dem Szenario 6A, d. h. es wird für die Eiskälteerzeugung ebenfalls ein zweistufiger Prozess aufgebaut. Die beiden Stufen setzen sich hier jedoch aus zwei thermisch angetriebenen Absorptionskältemaschinen zusammen.

Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass das BHKW Abwärme (zu etwa gleichen Anteilen) auf zwei unterschiedlich hohen Temperaturniveaus abgibt: Die Abwärme aus dem Rauchgas kann bei etwa 120 °C genutzt werden, die Motorabwärme liegt im Bereich 80 °C bis 90 °C. Die Hochtemperatur-Abwärme aus dem Rauchgas wird genutzt, um eine einstufige Ammoniak-Absorptionskältemaschine zur Eiskälteerzeugung zu betreiben.

Die Rückkühlung dieses Absorptionsprozesses erfolgt über eine zweite Absorptionskältemaschine auf LiBr-Basis, die gleichzeitig mit der Niedertemperatur-Abwärme angetrieben wird. Der vom BHKW erzeugte Strom kann entweder zum Antrieb der Kompressionskältemaschinen und zur Eigenversorgung des Gebäudes genutzt werden. Das BHKW ist mit 400 kW<sub>th</sub> ausgelegt.

Als Beispiel für die Auswertung sind für diese Variante die Energiemengen und die wichtigsten technischen Daten in der Übersicht unten zusammengefasst. Weitere technische Daten siehe [3].

<b>Wärme</b>		<b>282 MWh/a</b>	
Wirkungsgrad Brenner		0.9 -	
Gas		313 MWh/a	
<b>Eiswasser -12/-8°C</b>		<b>444 MWh/a</b>	
COP Kältemaschine		2 -	
Strom		222 MWh/a	
<b>Kaltwasser 6/12°C</b>		<b>251 MWh/a</b>	
COP Kältemaschine		3 -	
Strom		84 MWh/a	
<b>Kühlturm gesamt</b>		<b>315 MWh/a</b>	
COP		15 -	
Strom		21 MWh/a	
<b>BHKW</b>			
Substitution Wärme		-169 MWh/a	(ca.50%)
Substitution Strom für Eis-Kälte (-12/-8°C)		-222 MWh/a	(100%)
Stromlieferung		-2472 MWh/a	
Gaseinsatz		6202 MWh/a	

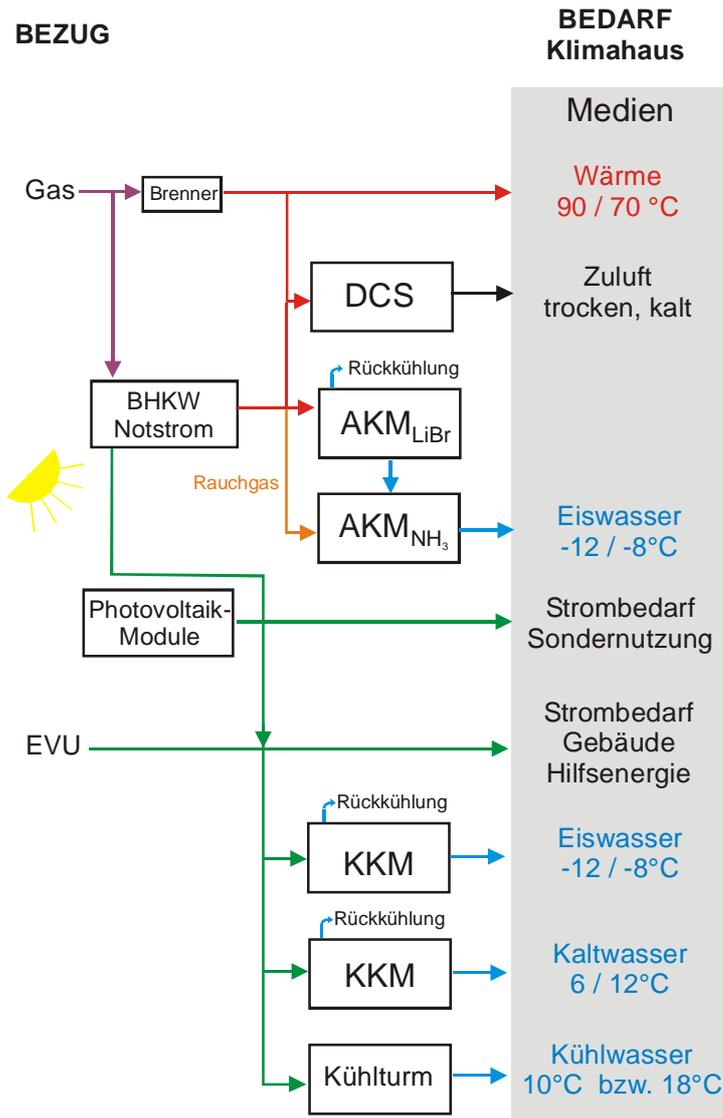


Abbildung 51: Schematische Darstellung von Versorgungsszenario 6B

## B: Ökonomische Bewertung, Stand November 2004 [3]

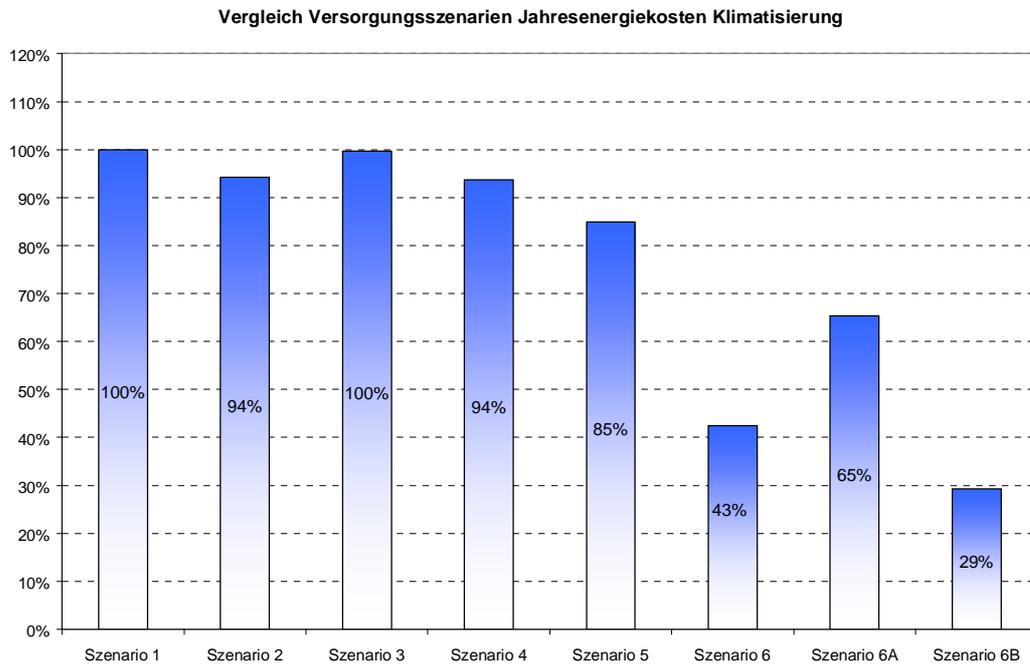


Abbildung 52: Vergleich der Versorgungsszenarien hinsichtlich der Jahres-Energiekosten durch die Gebäudeklimatisierung – prozentuale Werte (Variante 1 = 100%)

## C: Ökologische Bewertung, Stand November 2004 [3]

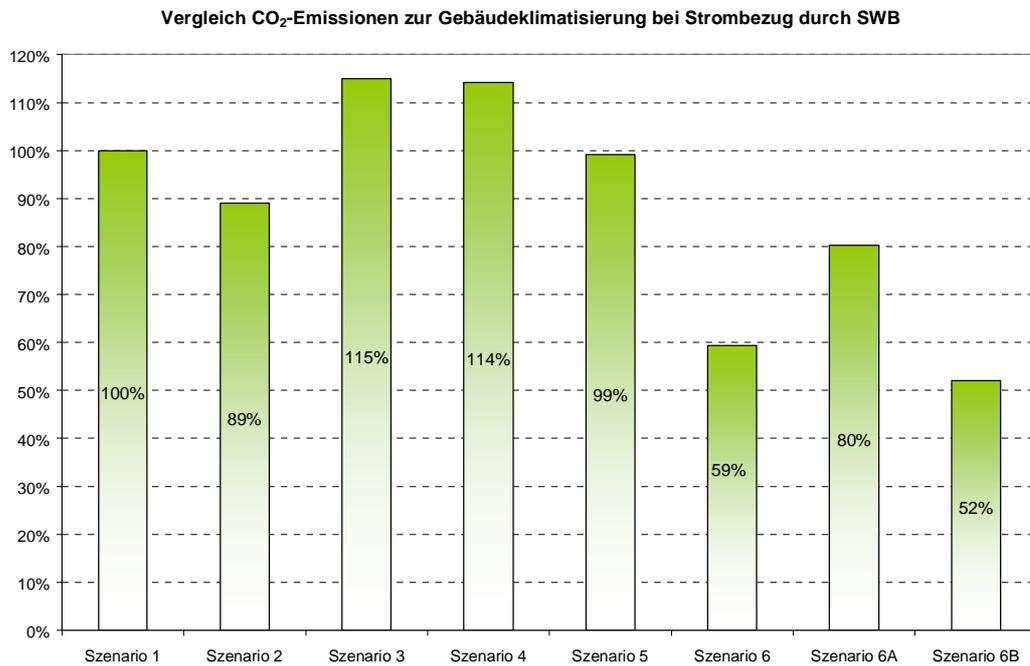


Abbildung 53: Vergleich der Versorgungsszenarien hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Gebäudeklimatisierung – prozentuale Werte